

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN : PROF. DR. -ING. DR.ING. E.H. K. KORDINA · PROF. DR.ING. F. S. ROSTÁSY



Untersuchungen der Eigenschaften von Fließbeton für den Straßen-und Wegebau

von
F.S. Rostásy und E.-H. Ranisch

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Bericht über eine vom Bundesminister für Verkehr
geförderte Forschungsarbeit

1979

I n h a l t

1. Einleitung
2. Betontechnologische Grundsätze des Fließbetons f.d.Straßenbau
3. Versuchsprogramm
 - 3.1 Versuchsbetone
 - 3.2 Durchgeführte Untersuchungen
 - 3.2.1 Frischbetonuntersuchungen
 - 3.2.2 Festbetonuntersuchungen
4. Baustoffe
 - 4.1 Fließmittel und Luftporenbildner
 - 4.2 Betonausgangsstoffe
 - 4.3 Betonzusammensetzung
 - 4.3.1 Zementgehalt und Wasserzementwert
 - 4.3.2 Kornzusammensetzung der Zuschläge
5. Herstellung der Versuchsbetone
 - 5.1 Vorversuche
 - 5.2 Hauptversuche
6. Frischbetonuntersuchungen
 - 6.1 Konsistenz
 - 6.2 LP-Gehalt und Rohdichte
 - 6.3 Betontemperatur
 - 6.4 Grenzneigung freier Oberflächen
7. Festbetonuntersuchungen
 - 7.1 Würfeldruckfestigkeit
 - 7.2 Bohrkerndruckfestigkeit
 - 7.3 Druckfestigkeit und Luftporengehalt
 - 7.4 Biegezugfestigkeit
 - 7.5 Elastizitätsmodul
 - 7.6 Wasserundurchlässigkeit
 - 7.7 Porengröße und -verteilung
 - 7.8 Kriechen und Schwinden
8. Bewertung der Untersuchungsergebnisse
 - 8.1 Vorbemerkungen
 - 8.2 Frischbetoneigenschaften

- 8.2.1 Konsistenz und Verarbeitbarkeit
- 8.2.2 Luftporengehalt
- 8.3 Festbetoneigenschaften
 - 8.3.1 Betondruckfestigkeit
 - 8.3.1.1 Allgemeines
 - 8.3.1.2 Normalerhärtende Fließbetone
 - 8.3.1.3 Frühhochfeste Fließbetone
 - 8.3.2 Biegezugfestigkeit
 - 8.3.3 Elastizitätsmodul
 - 8.3.4 Wasserundurchlässigkeit
 - 8.3.5 Porengröße und -verteilung
 - 8.3.6 Kriechen und Schwinden
- 9. Zusammenfassung
- 10. Literatur und Vorschriften

1. Einleitung

Fließbeton wird schon seit über 10 Jahren angewandt. Über die Wirkungen der Superverflüssiger oder Fließmittel und die Anwendungsmöglichkeiten von Fließbeton im Hoch- und Ingenieurbau liegen zahlreiche Veröffentlichungen vor [1] bis [15]. Die Vorteile des Fließbetons sind vor allem in einer vorzüglichen Verarbeitbarkeit und in einer Festigkeitssteigerung durch Wassereinsparung zu suchen. Da die DIN 1045, Jan. 1972, das nachträgliche Zumischen von Betonzusatzmitteln und eine Konsistenz oberhalb K 3 nicht zuläßt, wurde 1974 die Anwendung von Fließbeton durch die Herausgabe der Richtlinie für die Herstellung und Verarbeitung von Fließbeton (Fließbetonrichtlinie FBR) [37] erleichtert.

Im Straßenbau hat der Fließbeton trotzdem nur zögernd Eingang gefunden [16]. Das lag unter anderem daran, daß die nach der TV Beton 72 [35], der geltenden Vorschrift für den Betonstraßenbau, zusammengesetzten Straßenbetone mit den ersten Fließmitteln nur schwer fließfähig gemacht werden konnten.

Inzwischen ist es jedoch gelungen, die Wirksamkeit der Fließmittel weiter zu steigern. Im Straßenbau ist die Entwicklung von frühhochfestem Beton unter Verwendung von Fließmitteln von besonderem Interesse [17], [22], [23], [25], [29], um die unvermeidlichen Verkehrsbehinderungen zu verkürzen, wenn Straßenteile ersetzt oder ergänzt werden sollen.

Die Verwendung von Fließbeton im Straßenbau wurde inzwischen durch die Verabschiedung der ZTV-Beton 78 als Ersatz für die TV-Beton 72 und des "Merkblattes für Verkehrsflächen aus frühhochfestem Beton mit Fließmitteln (MfB)" [39], [40] ermöglicht.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte durch Laboruntersuchungen ein Beitrag zur optimalen Zusammensetzung von normalerhärtendem und frühhochfestem Fließbeton für den Straßenbau geleistet werden. Außerdem sollte festgestellt werden, ob hinsichtlich der Festbetoneigenschaften Unterschiede zwischen Null- und Fließbeton bestehen.

Das Forschungsvorhaben wurde vom Bundesminister für Verkehr in dankenswerter Weise finanziell gefördert. Wir bedanken uns bei den Mitgliedern der Betreuergruppe, den Herren Reimer, Siebel und Streit, für Beratung und Unterstützung. Weiterhin bedanken wir uns außerdem bei den folgenden Firmen, welche uns ihre Betonzusatzmittel zur Verfügung gestellt haben:

Chemische Fabrik Grünau GmbH.
Portland-Zementwerke Heidelberg
Woermann GmbH.

2. Betontechnologische Grundsätze des Fließbetons für den Straßenbau

Fließbeton ist ein leicht verformbarer Frischbeton mit einem Ausbreitmaß zwischen 51 und 60 cm, der nicht zur Entmischung neigt, und zu dessen Verarbeitung nur geringe Verdichtungsarbeit erforderlich ist. Er entsteht durch Zugabe besonderer Zusatzmittel, sogenannter Superverflüssiger oder Fließmittel, aus einem Ausgangsbeton, der hinsichtlich seiner Zusammensetzung und Konsistenz der DIN 1045 und den Straßenbauvorschriften entsprechen muß.

Fließmittel bestehen aus Melaminharz-Kondensationsprodukten und/oder gereinigten Ligninsulfonaten. Sie sind prüfzeichspflichtig.

Die maßgeblichen betontechnologischen Anforderungen der TV-Beton 72 und der ZTV-Beton 78 sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

T a b e l l e 1

(siehe Blatt 4)

T a b e l l e 1 : Betontechnologische Anforderungen an Straßenbetone für Decken der Verkehrsklassen I bis III

	TV-Beton 72	ZTV-Beton 78
Zement	Z 35 oder Z 45	Z 35 oder Z 45
W/Z-Wert	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$
Sandanteil	Anteil 0/1 mm $\leq 22\%$ ¹⁾	Anteil 0/2 $\leq 30\%$
Grobzuschlag	> 8 mm gebrochenes Material	> 8 mm zu 50% gebr. Material
Mehlkorngehalt	$\leq 400 \text{ kg/m}^3$ ¹⁾	$\leq 450 \text{ kg/m}^3$
LP-Gehalt	$\geq 4,0 \%$ ³⁾	$\geq 4,0 \%$ ^{2) 3)}
Druckfestigkeit	$\beta_{W28} \geq 400 \text{ kp/cm}^2$	$\beta_{W28} \geq 40 \text{ N/mm}^2$
Biegezugfestigkeit	$\beta_{BZ} \geq 55 \text{ kp/cm}^2$	$\beta_{BZ} \geq 5,5 \text{ N/mm}^2$

1) bei 32 mm Größtkorn

2) bei 32 mm Größtkorn und Mehlkorngehalt $\leq 400 \text{ kg/m}^3$

3) im Tagesmittel

Die nach diesen Anforderungen hergestellten Straßenbetone besitzen in der Regel die Konsistenz K 1 und müssen mit Fertigern verdichtet werden, die über die ganze Breite des zu betonierenden Deckenstreifens gleichmäßig wirken.

Die ZTV-Beton 78 erlaubt die Verwendung von Fließbeton. Hierfür sind die "Richtlinien für die Herstellung und Verarbeitung von Fließbeton" zu beachten. Eine Ergänzung der ZTV 78 zur Anwendung von Fließbeton ist in Vorbereitung [40].

Nach FBR muß der Ausgangsbeton ein gutes Zusammenhaltevermögen aufweisen und eine Frischbetonkonsistenz im Bereich Ende K 2/Anfang K 3 besitzen.

Nach MfB darf der Mehlkorngehalt 500 kg/m^3 nicht überschreiten. Die Konsistenz des Ausgangsbetons unmittelbar vor der Fließmittelzugabe soll, gemessen mit dem Ausbreitversuch, 25 bis 33 cm oder, gemessen mit dem Verdichtungsmaß, zwischen 1,20 und 1,40 liegen.

Das Fließmittel wird grundsätzlich erst auf der Baustelle unmittelbar vor dem Einbringen des Betons zugegeben.

3. Versuchsprogramm

3.1 Versuchsbetone

Folgende Betone sind zu unterscheiden:

Nullbetone : Vergleichsbetone ohne Fließmittel für
Festbetonuntersuchungen,
Ausgangsbetone: Betone vor der Fließmittelzugabe,
Normalerhärtende Fließbetone mit PZ 35 F nach FBR und
MfB,
Frühhochfeste Fließbetone mit PZ 45 F nach MfB.

Gemäß unseres Forschungsantrages sollte der Einfluß von drei verschiedenen Fließmitteln studiert werden. Weiterhin sollte in die Untersuchung der Einfluß der Kornzusammensetzung und des Wasserzementwertes einbezogen werden.

Damit ergeben sich folgende Versuchsbetone:

Serie 1 : Normalerhärtende Fließbetone mit PZ 35 F

- 1.1 Betone nach FBR mit stetiger Sieblinie mit Oker-splitt
- 1.2 Betone nach FBR mit Ausfallkörnung mit Okersplitt
- 1.3 Hochfeste Betone mit stetiger Sieblinie mit Oker-splitt
- 1.4 Hochfeste Betone mit Ausfallkörnung mit Okersplitt
- 1.5 Betone nach FBR mit stetiger Sieblinie mit Diabas-Splitt
- 1.6 Betone nach FBR mit Ausfallkörnung mit Diabas-Splitt

Serie 2 : Frühhochfeste Fließbetone mit PZ 45 F nach MfB

- 2.1 Betone mit stetiger Sieblinie
- 2.2 Betone mit Ausfallkörnung

3.2 Durchgeführte Untersuchungen

Die mit X gekennzeichneten Untersuchungen wurden nicht bei allen Betonen durchgeführt.

3.2.1 Frischbetonuntersuchungen

- Ausbreitmaß
- Verdichtungsmaß (nur für Konsistenzbereich K 1)
- LP-Gehalt
- Rohdichte
- Betontemperatur
- maximale Oberflächenneigung geneigt hergestellter Platten *

3.2.2 Festbetonuntersuchungen

- Würfeldruckfestigkeit nach 1^x, 2^x, 3^x, 7 und 28 Tagen
- Bohrkerndruckfestigkeit nach 60 Tagen *
- Biegezugfestigkeit nach 2^x, 7^x und 28 Tagen
- E-Modul nach 2^x, 7^x und 28 Tagen
- Wassereindringtiefe *
- Schwinden *
- Kriechen *
- Sedimentation
- Porengröße * und -verteilung

4. Baustoffe

4.1 Fließmittel und Luftporenbildner

Es wurden drei Fließmittel von überregionaler Verbreitung ausgewählt, welche nach Angabe der Hersteller für Straßenbetone geeignet sind. Als Luftporenbildner kam ein LP-Mittel des jeweiligen Fließmittelherstellers zur Anwendung. Während der Durchführung der Versuche wurde von der Firma Woermann ein neues, besonders wirksames Fließmittel speziell für Straßenbetone entwickelt. Auf Wunsch der Fa. Woermann wurden mit diesem Fließmittel zusätzliche Versuche durchgeführt. Die entstehenden Kosten dafür werden von der Fa. Woermann übernommen.

Für die Prüfserien wurden die nachstehend aufgeführten Fließmittel (FM) jeweils einer Charge verwendet:

Serie A : Addiment Betonverflüssiger F (BV)
Addiment Luftporenbildner S (LP)

Serie B : Acosal Fluid 3o7 (BV)
Tricosal Luftporenbildner S (LP)

Serie C : Woermann Fließmittel 75 (BV)
Woermann Mischöl K (LP)

Serie W : Woermann Fließmittel 78 (BV)
Woermann Mischöl K (LP)

Serie N : Nullbeton ohne Fließmittel
Luftporenbildner der Serie A, B oder C

Chemische Untersuchungen:

Nach Angaben von [8] und [28] bestehen Fließmittel aus Ligninsulfonaten und/oder Formaldehyd-Melamin-Sulfonaten. Eine qualitative Analyse der Wirkstoffe ist aufwendig. Die folgende Tabelle 2 gibt deshalb nur die Hauptbestandteile an.

T a b e l l e 2 : Hauptbestandteile der Fließmittel

	Fließmittel		
	A	B	C
Trockenrückstand	19,84 %	19,80 %	25,19 %
Sulphat	6,49 %	7,32 %	10,36 %
Stickstoff	5,21 %	5,28 %	1,53 %

4.2 Betonausgangsstoffe

Die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten Zemente zeigt die folgende Tabelle 3.

T a b e l l e 3

(siehe Blatt 8)

T a b e l l e 3 : Eigenschaften der Zemente

Art	Prüfdatum	Mahlfeinheit (Blaine)	Druckfestigkeit			Biegezugfestigkeit 28 d
			2 d	3 d	28 d	
-	-	cm ² /g	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
PZ 35 F	10.10.77	-	-	26,82	46,99	7,46
	12.09.78	3050	-	25,61	47,09	7,88
PZ 45 F	04.04.78	3270	24,71	-	53,33	8,07

Die Zuschläge stammten aus dem Harz und Harzvorland. Nach Augenschein und Angaben der Hersteller entsprachen sie DIN 4226.

Es wurden folgende Fraktionen verwendet:

Kiessand 0/2 mm, 2/8 mm, 8/16 mm, 16/32 mm;

Okersplitt (quarzitische Grauwacke) 8/22 mm und Diabassplitt 8/22 mm.

4.3 Betonzusammensetzung

Aus der Literatur sind die Betonzusammensetzungen bekannt, mit denen bei sparsamer Fließmitteldosierung ein optimales Fließvermögen erzielt werden kann. Dabei haben sich grobkornarme Sieblinien nahe der Sieblinie B 16 bewährt. Im deutschen Betonstraßenbau werden aber sandarme Sieblinien mit gebrochenem Grobkorn und niedrigem Wasserzementwert bevorzugt. Die gewählten Betonzusammensetzungen sollten deshalb entsprechend der TV-Beton zusammengesetzt werden, obwohl damit ein geringeres Fließvermögen in Kauf genommen werden muß. Die Zusammensetzung der Versuchsbetone zeigen die Anlagen 1 und 2.

4.3.1 Zementgehalt und Wasserzementwert

Der Zement- und Wassergehalt wurde in Vorversuchen so bestimmt, daß die verlangten Festigkeiten einerseits und die gewünschte Konsistenz des Ausgangsbetons entsprechend FBR und MfB andererseits gerade erreicht wurden.

Aufgrund unterschiedlicher Konsistenz und unterschiedlichem LP-Volumens der einzelnen Mischungen ergaben sich unterschiedliche Frischbetonrohddichten. Somit stimmten der tatsächliche Zementgehalt, wie er mit Hilfe der Stoffraumrechnung aus den Frischbetonkennwerten (Rohddichte, LP-Gehalt) zurückgerechnet wurde, nicht immer mit dem Soll-Zementgehalt überein (siehe Tabelle 4).

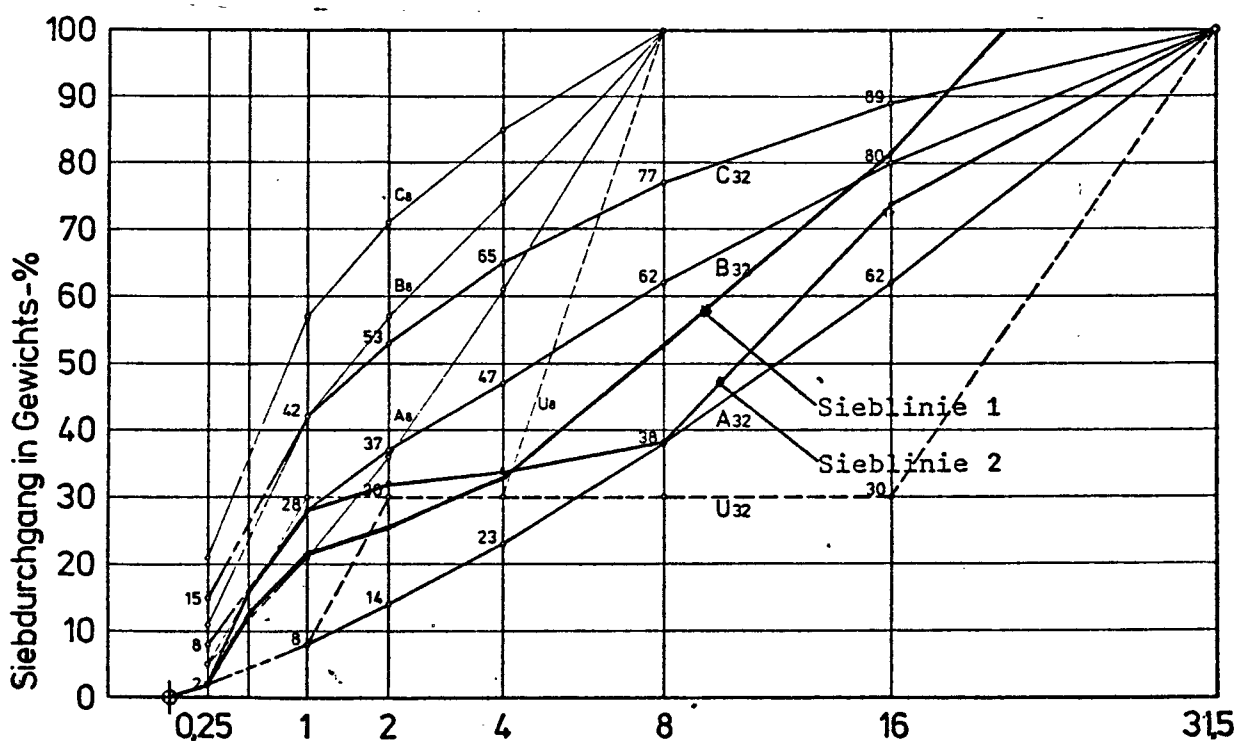
T a b e l l e 4 : Zementgehalt und Wasserzementwert

Beton Nr.	Zementgehalt		Wasserzementwert	
	Soll	Ist	Soll	Ist
-	kg/m ³	kg/m ³	-	-
1.1	350	350 - 366	0,46	0,41 - 0,48
1.2	350	346 - 361	0,46	0,45
1.3	390	391 - 419	0,39	0,36 - 0,39
1.4	390	394 - 411	0,39	0,37 - 0,40
1.5	350	351 - 368	0,46	0,42 - 0,46
1.6	350	355 - 365	0,46	0,43 - 0,44
2.1	370	370 - 377	0,40	0,40 - 0,41
2.2	370	370 - 375	0,40	0,38 - 0,40

4.3.2 Kornzusammensetzung der Zuschläge

Es wurden zwei verschiedene Sieblinien untersucht. Sieblinie 1 : Stetige Sieblinie in Anlehnung an TV-Beton 72 (Sandanteil etwas erhöht).

Sieblinie 2 : Ausfallkörnung nach ZTV-Beton 78. Bei einigen Zusatzversuchen wurde der Oker-Splitt durch Diabas-Splitt ersetzt. Die Sieblinien zeigt Bild 1.



5. Herstellung der Versuchsbetone

5.1 Vorversuche

Der Zweck der Vorversuche war, außer der bereits genannten Bestimmung des Wasseranspruchs und des Wasserzementwertes, auch die Bestimmung der erforderlichen LP-Mittel- und Fließmittel-Dosierung, mit der ein Luftporengehalt von 4 - 5 % und ein Ausbreitmaß von 55 - 60 cm erzielt werden kann. Die höchstzulässigen Zugaben der Fließmittel können den Prüfbescheiden entnommen werden. Sie betrugen für Fließmittel A und B : 30 ml je kg Zement und Fließmittel C: 20 ml je kg Zement. Die Höchstzugaben sollten bei den Versuchen nach Möglichkeit nicht angewandt werden.

5.2 Hauptversuche

In der Regel wurden Mischungen von je 100 l Frischbeton in einem Labor-Zwangsmischer hergestellt. Die Lufttemperatur im Labor betrug $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$.

Der Zement und die Zuschläge wurden zunächst 30 s lang trocken vorgemischt. Dann wurde das Zugabewasser zusammen mit dem

LP-Mittel zugegeben und weitere 90 s gemischt. Die Eigenfeuchte der Zuschläge war zuvor durch Darren bestimmt worden. Sie fand bei der Berechnung der Zugabewassermenge Berücksichtigung. Sofort nach dem Mischen und rd. 25 Min. danach wurden die Konsistenz des Ausgangsbetons durch den Ausbreitversuch und den Verdichtungsversuch nach DIN 1048 bestimmt. Der Luftporengehalt wurde mit dem Druckausgleichstopf gemessen.

30 Minuten nach der Wasserzugabe wurde das Fließmittel zugegeben und damit die Betone der Serie 1 eine Minute lang und die der Serie 2 drei Minuten lang gemischt. Anschließend folgte der Ausbreitversuch und die Messung des Luftporengehaltes. Danach wurden die Probekörper für die Festbetonuntersuchungen hergestellt. Ihre Verdichtung von 10 s Rütteldauer erfolgte auf einem Rütteltisch. Die Probekörper des Nullbetons hingegen wurden 60 s lang auf einem Rütteltisch verdichtet.

Die Frischbetontemperatur wurde mit einem Eintauchthermometer überwacht.

Die Lagerung und Prüfung der Probekörper erfolgte nach DIN 1048.

An einigen Fließbetonen wurde die Abnahme des Ausbreitmaßes in Abhängigkeit von der Zeit nach Fließmittelzugabe geprüft. Hierzu wurde in Abständen von 10 Minuten so oft das Ausbreitmaß festgestellt, bis wieder die Konsistenz des Ausgangsbetons erreicht war.

Die Herstellung der Betone der Serie 1 erfolgte in der Zeit von November 1977 bis Oktober 1978, die der Serie 2 von April 1978 bis August 1978.

6. Frischbetonuntersuchungen

6.1 Konsistenz

Die Konsistenz der Ausgangsbetone unmittelbar nach dem Mischen und nach 30 Minuten sowie die Ausbreitmaße der Fließbetone sind

auf den Anlagen 3 und 4 wiedergegeben. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse zeigt Tabelle 5. Als Maß für die Wirksamkeit der Fließmittel wurde die Zunahme des Ausbreitmaßes bezogen auf 1 kg Fließmittel je m³ Beton gewählt. Bei einigen Betonen ließ sich das Ausbreitmaß nicht bestimmen. In diesen Fällen wurde zur Bestimmung der Wirksamkeit des Fließmittels das Ausbreitmaß des Ausgangsbetons mit Hilfe seines Verdichtungsmaßes geschätzt. Das Zusammenhaltevermögen der Fließbetone beim Ausbreitversuch war in allen Fällen gut. Eine Entmischung konnte nicht festgestellt werden; auch nicht bei den Fließbetonen aus Ausgangsbetonen mit weniger gutem Zusammenhaltevermögen. Siehe hierzu die Fotos von Ausbreitversuchen auf den Anlagen 5 - 7.

T a b e l l e 5 : Mittlere Zunahme des Ausbreitmaßes bei FM-Zugabe ($a_o^F - a_{30}^O$) ^{+) u. FM-Wirksamkeit}
($a_o^F - a_{30}^O$) : (FM-Menge)

Beton-Nr.	Fließmittel A		Fließmittel B		Fließmittel C	
	$a_o^F - a_{30}^O$	$a_o^F - a_{30}^O$	$a_o^F - a_{30}^O$	$a_o^F - a_{30}^O$	$a_o^F - a_{30}^C$	$a_o^F - a_{30}^O$
		(FM)		(FM)		(FM)
	cm	cm/kgm ⁻³	cm	cm/kgm ⁻³	cm	cm/kgm ⁻³
1.1	22	3,70	23	3,87	22	3,65
1.2	29	5,52	20	3,81	20	3,81
1.3	23	2,46	30	3,17	33	4,23
1.4	31	3,97	36	6,15	28	3,27
1.5	19	2,41	21	3,43	17	2,78
1.6	23	3,29	23	3,76	26	3,71
2.1	32	3,01	18	1,77	15	2,03
2.2	31	3,05	28	2,75	28	3,55
Mittel		3,43		3,59		3,38

+) Die Hochzeiger F oder O kennzeichnen im Zweifelsfall Untersuchungen, die an Fließ- bzw. Nullbetonen durchgeführt worden sind.

Um zu überprüfen, ob die Fließmittel im Laufe der Lagerungszeit an Wirksamkeit verlieren, wurde nach Beendigung der Serien-Versuche die Wirksamkeit der mehr als 1 Jahr alten Fließmittel stichprobenweise geprüft. Dabei ergaben sich keine Anhaltspunkte für eine Lagerungszeitabhängigkeit der Wirksamkeit der untersuchten Fließmittel.

Das durch die Fließmittel-Zugabe erzielte Ausbreitmaß von 50 - 60 cm nimmt erfahrungsgemäß schnell wieder ab, so daß Fließbeton rasch verarbeitet werden muß. Die zeitliche Abnahme des Ausbreitmaßes wurde an einigen Betonen bestimmt. Die Ergebnisse sind als Diagramme auf den Anlagen 8 und 9 wiedergegeben. Dort ist zu sehen, daß sich bei den verschiedenen Fließmitteln keine auffälligen Unterschiede ergaben. Zusammenfassend kann gefolgert werden, daß das Ausbreitmaß unabhängig von seiner ursprünglichen Größe innerhalb der ersten halben Stunde nach der Fließmittelzugabe um 6 - 12 cm abnimmt. Bei höherer Fließmittel-Dosierung nimmt das Ausbreitmaß langsamer ab.

6.2 Luftporengehalt und Rohdichte

Da Straßenbetone zur Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstandes künstlich eingeführte Luftporen enthalten müssen, wurde allen Betonen ein LP-Mittel zugegeben. Die Dosierung war für einen angestrebten LP-Gehalt von 4 Vol.-% mit Hilfe der Vorversuche ermittelt worden. Trotzdem ergaben sich große Unterschiede im LP-Gehalt der einzelnen Versuchsbetone.

Der LP-Gehalt wurde mit dem Druckausgleichsverfahren nach DIN 1048 am Ausgangs- und Fließbeton unmittelbar vor bzw. nach der Fließmittel-Zugabe bestimmt. Die Rüttelzeit betrug dabei für die Ausgangsbetone 60 s und für die Fließbetone 10 s.

Die Würfel für die Prüfung der Druckfestigkeit (15 cm Kunststoffformen) wurden auf demselben Rütteltisch ebenfalls 10 s lang verdichtet. Dennoch lag die an den Würfeln bestimmte Frischbetonrohddichte fast immer etwas höher als die am Drucktopf bestimmte. Daraus ist zu schließen, daß die Verdichtungswirkung in der 3,75 l großen Kunststoffform intensiver als in dem 8 l großen, stählernen Drucktopf ist.

Mit Hilfe der Stoffraumrechnung wurde gefunden, daß ein Unterschied in der Rohddichte von $0,01 \text{ kg/dm}^3$ einem Unterschied von 0,2 Vol.-% im LP-Gehalt entspricht.

Frischbetonrohddichte und Luftporengehalt der Versuchsbetone sind auf den Anlagen 10 und 11 zusammengestellt. Das Diagramm auf Anlage 12 zeigt den Fließbeton-LP-Gehalt in Abhängigkeit vom Ausgangsbeton-LP-Gehalt.

Bei den Ausgangsbetonen zeigte sich, daß auch nach längerer Verdichtungszeit als 60 s die Rohddichte nicht mehr zunahm. Bei Fließbeton findet bei längerer Verdichtungszeit als 10 s eine Entmischung statt.

6.3 Maximale Oberflächenneigung geneigt hergestellter Platten

Die Oberflächen von Betonstraßen werden in der Regel geneigt hergestellt. Das ist mit herkömmlichen Straßenbetonen von steifer Konsistenz problemlos möglich. Fließbetone dagegen besitzen wegen ihrer außerordentlich hohen Verformbarkeit die Neigung, ähnlich einer Flüssigkeit eine horizontale Oberfläche zu bilden. Deshalb sollte durch Versuche festgestellt werden, welche Grenzneigungen mit Fließbeton noch herstellbar sind. Dazu wurden mit den Betonen 1.1 A, 1.3 C, 1.4 A und 1.4 C Platten mit den Abmessungen $150 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$ betoniert. Die glatten Schalungsformen wurden mit Längsneigungen von 2, 3, 4 und 5 % aufgestellt. Der Beton wurde mit einem Betonkübel in die Mitte der Form eingebracht und konnte dann mühelos mit einer Harke in der Form verteilt und "entlüftet" werden (s. Fotos auf den Anlagen 13 u. 14).

Versuchsergebnisse:

Mit Fließbetonen mit einem Ausbreitmaß von rund 60 cm waren die Platten mit Neigungen bis zu 3 % füllbar; bei einem Ausbreitmaß von rund 55 cm waren Platten von 4 % Längsneigung gerade noch füllbar. In jedem Falle war das Abziehen und Herstellen der Oberflächenneigung (z.B. mit einer Aluminium-Latte) erst nach mindestens 45 Minuten möglich. Der Deckenschluß mit einem Besenstrich konnte erst 90 Minuten nach dem Betonieren hergestellt werden.

Eine Platte aus dem Versuchsbeton 1.1 A wurde der Länge nach aufgesägt, um die Schnittflächen durch Inaugenscheinnahme hinsichtlich Sedimentation und Verdichtung beurteilen zu können (s. Bilder 10 und 11). Außerdem wurden Bohrkern von 15 cm Durchmesser entnommen, an denen nach TV-Beton 72 die Druckfestigkeit geprüft wurde.

An allen Schnittflächen zeigten die Betone eine gleichmäßige Verteilung des Grobzuschlages und waren ausreichend verdichtet. Eine Sedimentation fand nicht statt. Die an den Bohrkernen ermittelten Druckfestigkeiten entsprachen bei Auswertung nach TV-Beton 72 der Würfeldruckfestigkeit (s. Abschn. 7.2).

7. Festbetonuntersuchungen

7.1 Würfeldruckfestigkeit

Die Würfeldruckfestigkeit wurde an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge im Alter von 2, 7 und 28 Tagen geprüft. Die vollständigen Prüfergebnisse sind in den Anlagen 16 und 17 wiedergegeben. Dort ist auch das Verhältnis von Fließbetondruckfestigkeit zu Nullbetondruckfestigkeit angegeben. Dabei ist zu bedenken, daß der Nullbeton herstellungsbedingt nicht mit dem Ausgangsbeton des betreffenden Fließbetons identisch war. Hierdurch ergaben sich unvermeidbare Unterschiede im Luftporengehalt, der von großem Einfluß auf die Druckfestigkeit ist (s. Abschn. 7.3). So ist festzustellen, daß von den 26 Fließbetonen der Serie 1

in 19 Fällen das Verhältnis

$$\beta_W^F : \beta_W^O < 1, \text{ wenn } p^F - p^O > 0 \text{ oder}$$

$$\beta_W^F : \beta_W^O > 1, \text{ wenn } p^F - p^O < 0 \text{ ist.}$$

Beim frühhochfesten Fließbeton lagen die Verhältnisse ähnlich. Die Luftporengehalte waren hierbei über die Stoffraumrechnung errechnet worden (s. Abschn. 6.2).

Eine Zusammenstellung der Druckfestigkeitsverhältniswerte der 4 untersuchten Fließmittel zeigt die Tabelle 7. Eine entsprechende Zusammenstellung für die verschiedenen Betonzusammensetzungen enthält Anlage 18.

T a b e l l e 6 : Verhältniswerte der Druckfestigkeiten für die untersuchten Fließmittel

	FM A		FM B		FM C		FM W
	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2	Serie 2
$p^F - p^O$	0,04	0,73	0,50	-0,15	-0,26	0,80	1,75
$\beta_{W2}^F : \beta_{W2}^O$	0,82	1,02	0,89	1,20	0,96	1,03	1,06
$\beta_{W7}^F : \beta_{W7}^O$	0,98	0,91	0,93	1,05	1,06	1,03	1,06
$\beta_{W28}^F : \beta_{W28}^O$	0,99	1,04	0,96	1,04	1,06	1,04	1,01
$\beta_{W28}^F : \beta_{W7}^F$	1,29	1,30	1,27	1,17	1,26	1,25	1,21
$\beta_{W28}^F : \beta_{W2}^F$	2,14	1,67	2,04	1,50	1,92	1,70	1,57

Auf den Anlagen 19 und 20 sind die Würfeldruckfestigkeiten der Fließbetone in Abhängigkeit der Nullbetone für jeden einzelnen Würfel aufgetragen. Die Diagramme enthalten außerdem jene Gerade, deren Steigung das mittlere Druckfestigkeitsverhältnis wiedergibt. Für gleiche Null- und Fließbetondruckfestigkeit als Mittelwert der Einzelergebnisse würde der Steigungswinkel 45° betragen. Die gefundenen Werte streuten vom $42,1^\circ$ bis $46,6^\circ$.

7.2 Druckfestigkeit von Bohrkernen

Aus den in Abschn. 6.3 beschriebenen Platten wurden Bohrkern von 15 cm Durchmesser entnommen. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte nach TV-Beton 72 im Alter von 60 Tagen. Die Druckfestigkeit des Bohrkernes kann somit der Würfeldruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen gleichgesetzt werden, wenn die Bohrkernfestigkeit durch den Formbeiwert f geteilt wird. Dieser beträgt für die 20 cm hohen Bohrkern 0,91.

T a b e l l e 7 : Bohrkerndruckfestigkeiten

Beton Nr.	Güteprüfung ρ_b β_{W28}		Bohrkernprüfung ρ_b $\beta_{C60:0,91}$		5 : 3
-	kg/dm ³	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	-
1	2	3	4	5	6
1.1 A	2,34	41,6	2,35	50,9	1,22
1.3 C ₂	2,34	56,4	2,36	64,4	1,14
1.4 A	2,39	49,6	2,35	59,3	1,20
1.4 C ₂	2,42	68,9	2,33	67,0	0,97
1.4 N ₁	2,42	62,0	2,34	45,2	0,73

7.3 Druckfestigkeit und Luftporengehalt

Auf den Anlagen 21 bis 22 sind für die verschiedenen Betonarten die Druckfestigkeiten in Abhängigkeit vom Luftporengehalt aufgetragen.

Die Einzelwerte der Betone nach Fließbetonrichtlinie und der frühhochfesten Betone ließen sich mit Hilfe der Regressionsanalyse durch die Funktion $y = ae^{bx}$ annähern. Der Korrelationskoeffizient betrug bei den Betonen nach FBR $r = 0,61$ bzw. $r = 0,84$ bei den frühhochfesten Betonen. Bei den Betonen der Serie 1.3 und 1.4 war eine Annäherung weniger gut möglich.

Immerhin ist an den Näherungskurven zu erkennen, daß eine Zunahme des Luftporengehaltes von 1 Vol.-% einen Druckfestigkeitsverlust von 3 - 4 N/mm² bewirkt. Dieser Zusammenhang wird auch in [12] beschrieben.

7.4 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit der Versuchsbetone wurde an Balken 10 x 15 x 70 cm³ im Alter von 28 Tagen nach DIN 1048 bestimmt. Die Fließbetonbalken wurden 10 s lang und die Nullbetonbalken 60 s lang auf einem Rütteltisch verdichtet. Die Ergebnisse sind auf Anlage 23 wiedergegeben. Eine Zusammenstellung der Verhältniszahlen der Biegezugfestigkeiten zeigt Tabelle 8, eine Zusammenstellung für die verschiedenen Betonzusammensetzungen zeigt Anlage 18.

T a b e l l e 8 :

	Fließmittel A		Fließmittel B		Fließmittel C		FMW
	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2	Serie 2
$\beta_{BZ}^F : \beta_{BZ}^O$	1,02	0,99	0,96	1,09	0,96	0,89	1,10
$C = \frac{\beta_{BZ}^F}{\sqrt[3]{\beta_{W20,1}^2}}$	0,87	0,85	0,84	0,85	0,81	0,76	0,91

Der LP-Gehalt ist ohne signifikanten Einfluß auf die Biegezugfestigkeit (s. Diagramme auf Anlage 24). Den Einfluß der Splittart und -menge auf den Faktor C zeigt die Tabelle 9.

T a b e l l e 9

(siehe Blatt 19)

T a b e l l e 9 :

Sieblinie	Splittanteil		$c = \frac{\beta_{BZ}}{\sqrt[3]{\beta_W^2 \cdot 0,1}}$		
	Oker	Diabas	c_{min}	c_{max}	\bar{c}
1a	52 %	-	0,69	1,04	0,85
1b	-	52 %	0,80	1,14	0,94
2a	68 %	-	0,71	0,88	0,81
2b	34 %	-	0,61	0,95	0,74
2c	-	34 %	0,73	0,93	0,83

7.5 Elastizitätsmodul

Der statische Elastizitätsmodul der Versuchsbetone wurde nach DIN 1048 Blatt 3 an gesondert hergestellten Zylindern von 15 cm Durchmesser und 35 cm Höhe im Alter von 28 Tagen geprüft. Die Zylinder aus Fließbeton waren 10 s lang und die Nullbetonzylinder 60 s lang auf einem Rütteltisch verdichtet worden.

Die Prüfungsergebnisse sind auf Anlage 25 wiedergegeben. Ein möglicher Einfluß des Luftporengehaltes auf den E-Modul ist wegen der geringen Zahl von Prüfungen nicht bestimmbar.

Eine Zusammenstellung der Verhältniszahlen der E-Moduln für die 4 untersuchten Fließmittel zeigt die Tabelle 10.

T a b e l l e 10

(siehe Blatt 20)

T a b e l l e 10 :

	Fließmittel A		Fließmittel B		Fließmittel C		Fließmittel W
	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2	Serie 1	Serie 2	Serie 2
$p^F - p^O$	-0,37	2,10	1,02	-	-0,63	0,20	0,40
$E^F : E^O$	0,98	0,94	0,93	-	0,98	0,96	0,95
$E_{28} : \sqrt{\beta_{W28}}$	4290	4150	4210	-	4130	4060	3980

Nach CEB ist der E-Modul der Quadratwurzel aus der Würfeldruckfestigkeit proportional: $E = 19000 \sqrt{\beta_W} \text{ [kp/cm}^2\text{]}$ bzw. $E = 6010 \sqrt{\beta_W} \text{ [N/mm}^2\text{]}$.

Der Proportionalitätsfaktor lag bei den Versuchsbetonen deutlich niedriger. Der Rechenwert des E-Moduls nach DIN 1045 von $34\ 000 \text{ N/mm}^2$, der zu dem nach ZTV-Beton gehörenden B 35 zuzuordnen ist, wurde von keinem der Versuchsbetone erreicht.

7.6 Wasserundurchlässigkeit

Die Wasserundurchlässigkeit der Versuchsbetone wurde nach DIN 1048 Blatt 1 an gesondert hergestellten Platten im Alter von 28 Tagen geprüft. Die Platten waren liegend hergestellt und 10 sec bei Fließbeton bzw. 60 s lang bei Nullbeton auf einem Rütteltisch verdichtet worden.

Die gemessenen Wassereindringtiefen sind auf Anlage 26 wiedergegeben. Sie streuten von 1,3 bis 5,0 cm und lagen im Mittel bei 2,5 cm. Mit einer Ausnahme war die Wassereindringtiefe der Fließbetone größer als die der dazugehörigen Nullbetone.

7.7 Porengröße und -verteilung

Nach ZTV-Beton 78 müssen Straßenbetone in Abhängigkeit vom Zuschlag-Größtkorn und der Mehlkornmenge im Frischbeton einen vorgeschriebenen Mindest-Luftgehalt besitzen. Eine Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstandes bewirken jedoch im wesentlichen nur die Mikroluftporen mit einem Durchmesser bis zu 0,3 mm [27]. Solche Mikroluftporen werden von den luftporenbildenden Betonzusatzmitteln, die die Anforderungen der "Prüfzeichen-Richtlinien" erfüllen, in ausreichender Menge erzeugt. Deshalb reicht bei üblichen Luftporenbetonen die Feststellung des Luftgehaltes am Frischbeton im allgemeinen für die Beurteilung aus, ob ein für hohen Frost-Tausalz-Widerstand ausreichender Gehalt an Mikroporen vorhanden ist.

Bei der Zugabe von Fließ- und LP-Mitteln muß nach [38] vor Beginn der Bauausführung nachgewiesen werden, daß die beiden Betonzusatzmittel miteinander verträglich sind und jedes für sich wirksam ist. Insbesondere muß sichergestellt sein, daß der Gehalt an Mikroluftporen nicht vermindert wird. Die Bestimmung der Luftporenkennwerte (Mikroluftporengehalt, Abstandsfaktor) ist nur am erhärteten Beton möglich. Der Abstandsfaktor ist ein aus einem idealisierten Porensystem abgeleiteter Kennwert für den Abstand eines Punktes des Zementsteins von der nächsten Luftpore.

In der Bundesrepublik Deutschland darf für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand der Abstandsfaktor AF 0,20 mm nicht überschreiten und der Mikroluftporengehalt L 300 bei Beton mit 32 mm Zuschlaggrößtkorn 1,5 Vol.-% nicht unterschreiten.

Die Luftporenkennwerte werden mit dem Meßlinienverfahren nach Rosival in Anlehnung an ASTM C 457-71 T bestimmt.

Die Luftporenkennwerte wurden an 8 Versuchsbetonen nach dem makrofotografischen Sehnenmeßverfahren bestimmt [11]. Die Betonproben bestanden aus Abschnitten der Biegezugbalken und

hatten die Abmessungen von $10 \times 15 \times 5 \text{ cm}^3$. Von den beiden $10 \times 15 \text{ cm}^2$ großen Flächen der Prüfkörper wurden 96 Diapositive mit Betonausschnitten von $5 \times 5 \text{ mm}^2$ hergestellt und mit 250-facher Vergrößerung projiziert. Eine Auswahl von Abzügen der Dias zeigt die Anlage 27. Nach dem Sehnenmeßverfahren wurden bei einer Gesamtmeßlänge von 240 cm die vorhandenen Luftporen ausgemessen. Die Ergebnisse sind auf Anlage 28 wiedergegeben.

Der Gesamtluftporengehalt muß im erhärteten Beton größer sein als im Frischbeton, weil durch die Verdunstung des Überschusses wassers zusätzliche Hohlräume entstehen.

Bei sechs der acht untersuchten Betone war der Festbetonporengehalt jedoch kleiner als der Frischbetonporengehalt. Die Erklärung dürfte sein, daß die Verdichtungswirkung in der Balkenform die im Drucktopf übertrifft.

Der geforderte Mikroluftporengehalt L 300 wurde von 5 der 6 untersuchten Fließbetone und von den 2 Nullbetonen im Rahmen der Meßgenauigkeit erreicht. Der geforderte Abstandsfaktor wurde jedoch nur von 2 Fließbetonen und von den beiden Nullbetonen erreicht. Auffällig ist weiterhin, daß die spezifische Oberfläche der Luftporen bei den Nullbetonen deutlich größer war als bei den Fließbetonen.

7.8 Kriechen und Schwinden

Das Kriechen und Schwinden konnte nur in beschränktem Umfang und zwar an 7 Betonen der Serie 1 und 4 Betonen der Serie 2 untersucht werden. Dazu wurden zylindrische Probekörper von 20 cm Durchmesser und 80 cm Höhe hergestellt und im Normklima 20/65 gelagert. Die Schwind- und Kriechverformungen wurden an vier um 90° versetzten Meßstrecken von 50 cm Länge mit einem Setzdehnungsmesser gemessen.

Bei den Schwindkörpern erfolgte die erste Messung im Betonalter von 48 Stunden. Die Kriechkörper wurden im Alter von 7 Tagen

belastet. Die Kriechspannung betrug 20 % der Würfeldruckfestigkeit im Alter von 7 Tagen.

Die Beobachtungsdauer betrug 3 bis 12 Monate. Die Kriech- und Schwindverformungen nach 90 und 360 Tagen sind auf Anlage 29 wiedergegeben. Auf den Anlagen 30 - 33 sind die Kriech- und Schwindverformungen in Abhängigkeit von der Zeit in doppellogarithmischem Maßstab dargestellt. Die Kriechkurven der Betone der Serie 1 sind im Gegensatz zu denjenigen der Serie 2 leicht negativ gekrümmt. Das bedeutet, daß bei den normalerhärtenden Betonen nach Ablauf eines Jahres eine geringere Zunahme der Kriechverformungen zu erwarten ist als bei den frühhochfesten Betonen.

Die Kriechdehnungen der frühhochfesten Betone nach einer Belastungszeit von ca. 360 Tagen streuen von 0,31 bis 0,45 ‰ und betragen damit nur 55 % der Dehnungen der normalerhärtenden Betone (Streubereich 0,47 bis 1,03 ‰).

Die Schwindkurven der normalerhärtenden Betone sind - in doppellogarithmischem Maßstab aufgetragen - stärker negativ gekrümmt als die der frühhochfesten Betone. Die Schwindverformungen nach 360 Tagen liegen jedoch für beide Betonarten i.M. bei 0,60 ‰.

8. Bewertung der Untersuchungsergebnisse

8.1 Vorbemerkungen

Durch dieses Forschungsvorhaben sollte ein Beitrag zur optimalen Zusammensetzung von Fließbeton für den Straßenbau geleistet werden. Dazu sollten 3 verschiedene Fließmittel mit 2 Sieblinien und 2 Wasserzementwerten kombiniert werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens war es deshalb von vorn herein nicht möglich, durch Variation aller Einflußgrößen eine optimale Fließbetonzusammensetzung zu finden. Da Straßenbetone in der Regel mit

den örtlich verfügbaren bzw. wirtschaftlich beschaffbaren Zuschlägen hergestellt werden müssen, erscheint ein solches "Patentrezept" auch wenig sinnvoll. Auch gibt es inzwischen eine umfangreiche Literatur über zweckmäßige Betonzusammensetzungen für Fließbetone, deren Anwendung durch die ZTV-78 in gewissen Grenzen ermöglicht wurde.

Wir haben uns deshalb darum bemüht, im Rahmen der zu Beginn unserer Forschungsarbeit noch gültigen TV-Beton 72 die Grenzen des Machbaren aufzuzeigen. Es wurden deshalb einerseits geringe Sandanteile und andererseits teilweise hohe Splittanteile verwendet. Solche Betonzusammensetzungen haben sich im Betonstraßenbau seit vielen Jahren bewährt; zum Erreichen eines hohen Fließvermögens sind sie dagegen weniger gut geeignet.

Wegen der relativ geringen Anzahl von Versuchsbetonen bei gleichzeitiger, großer Streuung der Einzelwerte ist eine statistisch abgesicherte Aussage über keinen der sicherlich vorhandenen Einflußfaktoren wie zum Beispiel

- Sieblinie
- Mehlkornmenge
- Wasserzementwert
- Fließmittelart- und -menge
- Luftporengehalt

usw. möglich. Wegen der gerade bei Beton mit Zusatzmitteln vorhandenen, großen Streuungen von Frisch- und Festbetonkennwerten, sind auch aus den in den Tabellen 6 - 10 ausgewiesenen Mittelwerten noch keine Gesetzmäßigkeiten abzuleiten.

Bei der folgenden, abschließenden Bewertung der Versuchsergebnisse werden daher nur die Tendenzen aufgezeigt, wie sie sich bei den Versuchen mehr oder weniger in Übereinstimmung mit Literaturangaben abzeichneten.

8.2 Frischbetoneigenschaften

8.2.1 Konsistenz und Verarbeitbarkeit

Die drei Fließmittel A, B und C waren etwa gleich wirksam. Bei Ausgangsbetonen mit einem Ausbreitmaß im oberen Bereich von K 2 genügt eine Fließmittelmenge von ca. 1,5 ml je kg Zement zur Erhöhung des Ausbreitmaßes auf mehr als 55 cm. Steifere Ausgangskonsistenzen erforderten Dosierungen von 2,0 bis 2,75 % (entspr. ca. 20 bis 27,5 ml/kg Zement). Die FM A und B dürfen lt. Prüfbescheid mit maximal 30 ml je kg Zement dosiert werden, die FM C und W mit maximal 20 ml. Bei sehr steifen Ausgangsbetonen reichte diese Zugabe von 20 ml je kg Zement nicht immer aus. Das FM W scheint etwas wirksamer zu sein als die anderen Fließmittel. Auch aus Ausgangsbetonen, die beim Ausbreitversuch auseinanderfielen, wurden Fließbetone, die sich nicht entmischten (s. Anlage 7) erzielt.

Die zeitabhängige Abnahme des Ausbreitmaßes war bei allen Fließmitteln etwa gleich; höhere Fließmitteldosierungen bewirken eine langsamere Abnahme des Ausbreitmaßes.

Die Verarbeitbarkeit von Fließbetonen mit einem Ausbreitmaß über 55 cm kann - unabhängig vom verwendeten Zuschlag - als ausgezeichnet bezeichnet werden. Unbewehrte, plattenförmige Bauteile erfordern dann keine Rüttelverdichtung. Das Verteilen des Betons mit einer Harke bewirkt eine ausreichende Entlüftung. Ein leichtes Stochern entlang der Randschalungen ist empfehlenswert. Geneigte Oberflächen mit Neigungen bis zu 3 % sollten erst nach dem Abklingen der verflüssigenden Wirkung abgezogen werden.

Betone mit einem Ausbreitmaß von weniger als 55 cm sind auch in größeren Neigungen einzubauen. Diese Betone erfordern jedoch eine leichte Rüttelverdichtung am besten durch leichte Innenrüttler. Rüttelbohlen bewirken eine Mörtelanreicherung

an der Oberfläche und sind deshalb für Verkehrsflächen aus Fließbeton weniger gut geeignet.

Eine Sedimentation oder Entmischung konnte bei keinem der untersuchten Fließbetone beobachtet werden.

8.2.2 Luftporengehalt

Es wurde für alle Versuchsbetone ein Luftporengehalt von 4,0 Vol.-% angestrebt und die dazu erforderliche Dosierungsmenge der luftporenbildenden Zusatzmittel in Vorversuchen ermittelt. Dennoch ergaben sich trotz sorgfältigen Abmessens aller Bestandteile und labormäßigen Arbeitens schon bei den Ausgangsbetonen erhebliche Streuungen im Luftporengehalt. Die Luftporengehalte der Fließbetone streuten noch stärker und lagen bei den Fließbetonen der Serie 2 im Mittel um 1,1 Vol.-% über denjenigen der Ausgangsbetone. Die Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse einer statistischen Auswertung der Luftporengehalte. An den hohen Variationskoeffizienten sind die Schwierigkeiten beim Einstellen eines gleichmäßigen LP-Gehaltes ablesbar.

T a b e l l e 11 : Statistische Auswertung der Luftporengehalte im Frischbeton bei Prüfung nach DIN 1048 Teil 1

	Beton Serie 1		Beton Serie 2	
	Ausgangs- beton	Fließ- beton	Ausgangs- beton	Fließ- beton
Probenanzahl n	36	27	16	10
Luftporengehalt in Vol.-%	$\bar{p}^A = 4,4$	$\bar{p}^F = 4,4$	$\bar{p}^A = 4,0$	$\bar{p}^F = 5,1$
Standardabweichg. in Vol.-%	0,6	1,1	0,6	0,9
Variationskoeffizient	13,1 %	24,8 %	15 %	18 %
Verhältnis $\bar{p}^F : \bar{p}^A$	-	0,97	-	1,29
Variationskoeffizient	-	18 %	-	24 %

Die stichprobenhafte Überprüfung der Luftporengehalte am Festbeton ergab z.T. erhebliche Unterschiede im Vergleich zum Frischbeton.

Da ein zu kleiner Luftporengehalt die Frost-Tausalz-Beständigkeit ungünstig beeinflusst und ein zu hoher die Druckfestigkeit vermindert, erscheinen die großen Streuungen insofern bedenklich, da sie bereits bei labormäßigem Arbeiten auftraten.

8.3 Festbetoneigenschaften

8.3.1 Betondruckfestigkeit

8.3.1.1 Allgemeines

Wie an den Diagrammen auf den Anlagen 19 und 20 zu erkennen ist, sind aus den vorliegenden Versuchsergebnissen keine tendenziellen Druckfestigkeitsunterschiede für gesondert hergestellte Probewürfel ableitbar. Eine deutliche Beeinflussung der Erhärtungsgeschwindigkeit zeichnete sich ebenfalls nicht ab.

Dagegen wiesen die aus den mit Fließbeton hergestellten Versuchsplatten entnommenen Bohrkern bei Prüfung nach ZTV-Beton 78 eine deutlich höhere Druckfestigkeit sowohl gegenüber den Bohrkernen aus Nullbetonplatten als auch gegenüber den Gütewürfeln auf.

Es ist anzunehmen, daß überraschenderweise der "entlüftete" Fließbeton besser verdichtet war als der mit Innenrüttlern verdichtete Nullbeton. Wegen der geringen Anzahl von Prüfungen ist diese Beobachtung vorsichtig zu bewerten.

Der Einfluß der Kornzusammensetzung auf die Druckfestigkeit war - wie aus Anlage 18 bis 20 ersichtlich ist - offenbar klein.

Der Einfluß eines unterschiedlichen Luftporengehaltes konnte dagegen in Übereinstimmung mit [12] zu 3 - 4 N/mm² je Vol.-%-Luftporendifferenz bestimmt werden.

Auf Anlage 35 sind die 5 %- und 95 %-Fraktilewerte der Fließbetondruckfestigkeiten in Abhängigkeit der dazugehörigen Null-

betondruckfestigkeiten mit den Annahmefaktoren nach DIN 1048 Teil 4 aufgetragen. Außerdem sind die Druckfestigkeiten eingezeichnet, die für den festgestellten Luftporengehalt der Fließbetone als Sollwerte zu erwarten wären. Es fällt auf, daß die Streuung der Einzelwerte z.T. sehr groß ausfällt und daß der Sollwert sowohl im unteren als auch im oberen Bereich der Streuung liegen kann.

8.3.1.2 Normalerhärtende Fließbetone

Die Betone der Serien 1.1, 1.2, 1.5 und 1.6 wurden nach der Fließbetonrichtlinie zusammengesetzt. Mit dem für Straßenbauverhältnisse relativ hohen Zementgehalt von 350 kg/m^3 ergab sich zur Erzielung der nach FBR geforderten Konsistenz im oberen Bereich von K 2 ein Wasserzementwert von 0,46. Mit diesen Betonen wurden die von ZTV-Beton geforderten Druckfestigkeiten von 40 N/mm^2 gerade erreicht, die geforderten Biegezugfestigkeiten von $5,5 \text{ N/mm}^2$ konnten jedoch nur mit den Betonen der Serie 1.5 erreicht werden, die 52 % hochwertigen Diabas-Splitt im Zuschlag enthielten.

Die Betone der Serien 1.3 und 1.4 wurden in Anlehnung an [38] mit einem relativ hohen Zementgehalt von 390 kg/m^3 und einem Wasserzementwert von 0,39 hergestellt. Die Konsistenz lag hier im unteren Bereich von K 2. Mit diesen Betonen wurden relativ hohe Druckfestigkeiten erzielt. Die Biegezugfestigkeiten erreichten jedoch nur knapp den geforderten Wert.

Schlußfolgerungen:

Die Versuche bestätigen, daß es unzweckmäßig ist, normalerhärtende Fließbetone nach FBR herzustellen, wie es auch der Hinweis der ZTV-Beton 78 auf den Ergänzungsentwurf für Verkehrsflächen aus Beton mit Fließmitteln [40] schon berücksichtigt. Denn die Fließbetonrichtlinie verlangt eine plastische Ausgangskonsistenz, welche nur mit hohen Wassergehalten und entsprechend

hohen Zementgehalten zu erhalten ist. Damit ist die geforderte Druckfestigkeit zwar sicher, die Biegezugfestigkeit jedoch nur schwer zu erreichen.

Mit den auf dem Markt befindlichen Fließmitteln sind aber schon mit 60 % ihrer zulässigen Höchstdosierung aus Ausgangsbetonen mit einer Konsistenz im unteren Bereich von K 2 Fließbetone herzustellen, die kaum noch Verdichtungsarbeit erfordern. Der Zementgehalt sollte wegen der bekannten Nachteile hoher Zementmengen 350 kg/m^3 nicht übersteigen und der Wassermenge sollte kleiner als 0,42 sein. Die geforderte Biegezugfestigkeit verlangt die Verwendung eines hohen Anteils von hochwertigem Splitt.

8.3.1.3 Fröhlichfeste Fließbetone

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß mit den hier gewählten Betonzusammensetzungen die von [38] geforderten Druckfestigkeiten von 28 N/mm^2 nach 2 Tagen und von 40 N/mm^2 nach 28 Tagen sicher erreicht werden können. Die Erzielung der geforderten Biegezugfestigkeit verlangt einen hohen Anteil an gebrochenem Zuschlagmaterial. Die Ausgangsbetone mit der Konsistenz K 1 lassen sich durch Fließmittelzugabe soweit verflüssigen, daß kaum noch Verdichtungsarbeit erforderlich ist.

8.3.2 Biegezugfestigkeit

Aus den Versuchsergebnissen ist kein tendenzieller Einfluß der Fließmittelzugabe auf die Biegezugfestigkeit ablesbar. Auch der Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit, ausgedrückt durch den Faktor c nach Heilmann ($c = \frac{R_{BZ}}{\sqrt[3]{R_{Dr}^{2.0,1}}}$) wird durch die Fließmittelzugabe nicht signifikant beeinflusst. Der Faktor c wird jedoch durch die Art und die Menge des gebrochenen Zuschlagmaterials beeinflusst. Da der Luftporengehalt von geringem Einfluß auf die Biegezugfestigkeit aber von großem Einfluß auf die Druckfestigkeit ist, wird der Faktor c auch vom Luftporengehalt beeinflusst. Anhand

der vorliegenden Versuchsergebnisse ist eine Trennung beider Einflüsse nicht möglich. Der Einfluß des Luftporengehaltes auf die Biegezugfestigkeit scheint aber geringer als der des Zuschlages zu sein.

Der Zusammenhang von Druck- und Biegezugfestigkeit zeigt eindeutig, daß die von ZTV-Beton geforderten Mindestwerte der Druck- und Biegezugfestigkeit nicht gleichzeitig erreichbar sind. Je nach Art und Menge des Zuschlages wird man eine höhere Druckfestigkeit anstreben müssen, um die geforderte Biegezugfestigkeit zu erreichen.

8.3.3 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul wurde nicht für alle Versuchsbetone bestimmt. Bei den geprüften Fließbetonen war der E-Modul i.M. rd. 4 % kleiner als der der dazugehörigen Nullbetone. Alle gemessenen E-Moduln lagen erheblich unter dem nach DIN 1045 oder CEB anzusetzenden Rechenwert. Der LP-Gehalt und der Zuschlag üben offenbar nur einen geringen Einfluß auf die Größe des E-Moduls aus.

8.3.4 Wasserundurchlässigkeit

Wasserundurchlässiger Beton muß nach DIN 1045 so dicht sein, daß die größte Wassereindringtiefe 5 cm nicht überschreitet. Diese Anforderung wurde von allen Versuchsbetonen sicher erreicht. Die Wassereindringtiefen der Fließbetone lagen jedoch im Mittel um 50 % höher als die der Nullbetone. Die Ursache hierfür ist vermutlich der größere Porendurchmesser der Fließbetone (s. hierzu Abschn. 7.7 und 8.3.5).

8.3.5 Porengröße und -verteilung

Wegen der hohen Kosten für Porenuntersuchungen am erhärteten Beton konnte nur eine geringe Anzahl von Proben untersucht werden. Diese Probeflächen stellen jeweils nur einen sehr

kleinen Ausschnitt aus der gesamten Betoncharge dar. Es ist deshalb noch unbekannt, wie sich z.B. die Luftporen über die Dicke eines Betonteils verteilen und inwieweit die im Rahmen dieser Untersuchungen festgestellten Kennwerte repräsentativ für eine größere Betonfläche sind. Eine Angabe hierzu konnte nur in [12] gefunden werden. Danach sind mit 95 %-iger Wahrscheinlichkeit die Unterschiede zwischen den Luftgehalten im Frischbeton bei Drucktopfbestimmung und im Festbeton bei mikroskopischer Bestimmung kleiner als 1,65 Vol.-%.

Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen kann deshalb geschlossen werden, daß die Fließmittelzugabe eine Vergrößerung der einzelnen Luftporen gegenüber dem Ausgangsbeton bewirkt. Daraus kann eine Zunahme des maßgebenden Abstandsfaktors über 0,20 mm hinaus resultieren, wodurch jedoch die Frost-Tausalz-Beständigkeit der Fließbetone herabgesetzt würde.

Nach den geltenden Vorschriften muß bei gleichzeitiger Verwendung von Fließmitteln und Luftporenbildnern im Rahmen der Wirksamkeitsprüfung die Einhaltung des Abstandsfaktors geprüft worden sein. Bei der Verwendung von Fließbeton für den Straßenbau sollten deshalb vor Auswahl der Zusatzmittelkombination die Ergebnisse dieser Wirksamkeitsprüfungen eingesehen werden.

8.3.6 Kriechen und Schwinden

An den vorliegenden Kriech- und Schwindkurven ist zu erkennen, daß die zeitabhängigen Verformungen der Versuchsbetone im wesentlichen nur von der Art des Zementes beeinflusst wurden. Der Einfluß der anderen Parameter ist offenbar zu klein und ist aus den Versuchsdaten nicht ablesbar.

Auffällig ist, daß die gemessenen Kriechzahlen kleiner als die in DIN 1045 für die Konsistenzen K 1 und K 2 angegebenen Werte sind. Die gefundenen Schwindmaße waren dagegen sogar noch größer als die für das Konsistenzmaß K 3 bei Lagerung im Freien angegebenen Werte. Da sich keine auffälligen Unterschiede zwischen

Null- und Fließbetonen ergaben, kann die Ursache hierfür nicht in der Fließmittel-Zugabe liegen.

An dem Verlauf der Kriechkurven ist zu sehen, daß die Betone der Serie 1 wegen der größeren Nacherhärtung des PZ 35 F im Verhältnis zum PZ 45 F in der Anfangszeit eine höhere Kriechgeschwindigkeit besitzen, als die Betone der Serie 2. Die normalerhärtenden Betone scheinen aber das Endkriechmaß früher zu erreichen als die frühhochfesten Betone. Die Schwindgeschwindigkeit der normalerhärtenden Betone ist in der Anfangszeit ebenfalls größer. Die Kurven der Nullbetone liegen jeweils im Streubereich der Fließbetonkurven.

9. Zusammenfassung

In dem vorliegenden Forschungsbericht wurde über Frisch- und Festbetonuntersuchungen an insgesamt 36 Straßenbetonen mit Fließmitteln und 16 Vergleichsbetonen ohne Fließmittel berichtet. Aus den in Deutschland bewährten Betonzusammensetzungen lassen sich demnach durch Zugabe von Fließmitteln Betone mit einem Ausbreitmaß von mehr als 55 cm herstellen, welche bei großflächigem Einbau keiner Verdichtung mehr bedürfen. Diese Betone neigen nicht zu Sedimentation oder Entmischung und sind insofern zur Herstellung von Verkehrsflächen gut geeignet.

Übereinstimmend mit zahlreichen Literaturangaben konnten keine auffälligen Unterschiede in den Festigkeits- und Verformungseigenschaften zwischen Betonen mit und ohne Fließmittel festgestellt werden.

Als Nachteil der Fließbetone kann angesehen werden, daß der Luftporengehalt stärker streut als bei Normalbetonen. Außerdem scheinen die Fließmittel eine Vergrößerung der einzelnen künstlich eingeführten Luftporen zu bewirken, wodurch die Wasserundurchlässigkeit und Frost-Tausalz-Beständigkeit ungünstig beeinflusst werden kann.

10. Literatur und Vorschriften

- [1] Aignesberger, A. und H. Krüger:
Zusatz von anionischen Melaminharzlösungen zu Zement und Gips. Zement-Kalk-Gips 21 (1968), S. 415/419
- [2] Lehmann, H. und H. Dörr:
Der Einfluß wasserlöslicher anionischer Melaminharzlösungen auf die Eigenschaften von Zementmörteln
Tonindustrie-Zeitung 96 (1972), S. 143/149
- [3] Aignesberger, A. und H.G. Rosenbauer:
Langzeitverhalten eines Betons mit Zusatz eines anionischen Melamin-Formaldehyd-Kondensationsproduktes
Tonindustrie-Zeitung 97 (1973), S. 205/207
- [4] Morgan D.R.:
Possible mechanismus of influence of admixtures on time dependent volume changes in cement paste und concrete.
UNICIV Report No. R 114, Oct. 1973, University of New South Wales, Kensington, Australia
- [5] Breukmann, K:
Fließbeton - Betonwerk + Fertigteiltechnik 39 (1973), S. 517/519
- [6] Bonzel, J. und E. Siebel:
Fließbeton und seine Anwendungsmöglichkeiten
beton 1974, S. 20/24 und 59/63
- [7] Wolf, H.:
Fließbeton, Technologie u. Anwendung
Der Deutsche Baumeister 1974, S. 335/337
- [8] Lewandowski, R. und P. Peterfy:
Wirkungen und Nebenwirkungen von Superverflüssigern bei der Fließbeton-Herstellung
Betonwerk + Fertigteil-Technik 1974, S. 546/552 u. 597/600

- [9] Aignesberger, A. und A. Tambour:
Fließbeton-Herstellung und Verwendung
Zement und Beton 1974, Nr. 77, S. 1/5
- [10] Blaha, B.:
Schokbeton's Olympian precasting job.
Concrete Products, Nov. 1975
- [11] Gast:
Nachträgliche Bestimmung der Zusammensetzung von Beton
beton 1975, Heft 10
- [12] Reidenauer and Howe:
Air Content of Plastic and Hardened Concrete
Pensylvania Department of Transportation (73-1) Final Report
Febr. 1975
- [13] Braun, R.:
Einsatz von Fließmitteln in Betonfertigteilwerken
Neues vom Bau 22 (1976), H. 2 und 3
- [14] Müller, H.:
Fließbeton in der Praxis
Die Bauwirtschaft 1976, S. 423/429 u. 620/624
- [15] Bonzel, J.:
Fließbeton
Zementtaschenbuch 1976/77
- [16] Streit, G.:
Fließbeton im Straßenbau
beton 26 (1976), H.5 S. 167/171
- [17] von Stosch, H.-J.:
Frühhochfester Fließbeton im Straßenbau
Straße u. Autobahn 27 (1976), Nr.6, S. 215-219
- [18] Melment (R) - Anwendungen im Beton -
Süddeutsche Kalkstickstoff-Werke, Sept.1976

- [19] Haegermann:
Fließbeton im Straßen- u. Wegebau
Der Tiefbau 1976, H. 12, S. 813/817
- [20] Kern, E. u. H.-J. Koch:
Anwendung von Fließbeton
Beton- und Stahlbetonbau 71 (1976), H.12, S. 285/289
- [21] Teubert, J.:
Fließbeton als Straßenbeton
Straße und Autobahn 1976, H. 12, S. 480/483
- [22] Löwenberg, H.:
Fließbeton im Straßen- und Wegebau
Hochtief-Nachrichten 49, Ausg. Juli/Sept. 1976, S. 7/18
- [23] Löwenberg, H.:
Fließbeton als neue Anwendungsmöglichkeit im Straßenbau
Straße und Autobahn 1977, H. 6, S. 223/227
- [24] Khalil, S.M.:
Microstructure of cement hydrates containing calcium
lignosulfonate admixture
Mat. et. Constr. (Rilem) 10 (1977), Nr.56, S. 67-72
- [25] Bonzel, J.:
Frühhochfester Beton mit Fließmittel für Verkehrsflächen
beton 1977, S. 394-399
- [26] Hewlett, Peter and Roger Rixom:
Superplasticized Concrete
ACI-Journal, May 1977, S. N6 - N11
- [27] Bonzel, J. und E. Siebel:
Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand
von Beton
beton 27 (1977)
- [28] Rixom, M.R.:
Chemical Admixtures für Concrete
Londen 1978, JSBN 0419112502

- [29] Hattori, K.:
Superplasticizers in Concrete, Proceedings of an International Symposium held in Ottawa, Canada, 29-31 May 1978
- [30] Gauert, Claas-Ernst:
Auswechseln von Fahrbahndecken, Einbau von frühhochfestem Beton mit Fließmitteln in Hamburg
beton 9/78, S. 326-328
- [31] Bartos, Peter:
Workability of flowing concrete, Assessment by a free orifice rheometer, Concrete, Okt. 1978, S.28 - 30
- [32] Gierse, Klaus und A. Rühle:
Eine Problemlösung für den kommunalen Straßenbau - Beton mit Fließmittel -
Straße und Autobahn 1979, S. 21-24
- [33] Jacobs, Johann:
Straßenbau heute - Betondecken -
Schriftenreihe der Bauberatung Zement, 2. Aufl. 1979
- [34] Klug, Paul:
Verformungsverhalten von Beton mit Fließmittel
beton 5/79, S. 175-177
- [34a] Brooks, J.J. u.a.:
Superplasticiser effect on time-depent properties of air entrained concrete
Concrete June 1979, S.35-38

Vorschriften:

- [35] Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton
- TV Beton 72 -
- [36] DIN 1045: Beton und Stahlbetonbau

- [37] Richtlinie für die Herstellung und Verarbeitung von
Fließbeton (Fließbeton Richtlinie FBR) Fassung Mai 1974

- [38] Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für
den Bau von Fahrbahndecken aus Beton - ZTV Beton 78 -

- [39] Merkblatt für Verkehrsflächen aus frühhochfestem Beton
mit Fließmittel (MfB)
- Entwurfsfassung Januar 1978 -

- [40] Ergänzungsentwurf zur ZTV 78:
Verkehrsflächen aus Beton mit Fließmittel
- Fassung März 1979 -

Verzeichnis der Anlagen

- 1 - 2 Zusammensetzung der Fließ- und Nullbetone
- 3 - 4 Konsistenz der Versuchsbetone
- 5 - 7 Fotos von Ausbreitversuchen
- 8 - 9 Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der Zeit
- 10 -11 Luftporengehalt und Frischbetonrohichte
- 12_ Luftporen im Fließbeton in Abhängigkeit der Luftporen
im Ausgangsbeton
- 13 -14 Fotos vom Herstellen der Platten mit geneigter Oberfläche
- 15 Fotos von Betonschnittflächen
- 16 -17 Würfeldruckfestigkeit der Versuchsbetone
- 18 Übersichtstabelle zum Einfluß der Betonzusammensetzung
auf die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit
- 19 -20 Fließbetondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Null-
betondruckfestigkeit
- 21 -22 Würfeldruckfestigkeit in Abhängigkeit vom LP-Gehalt
- 23 Ergebnisse der Biegezugprüfungen
- 24 Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom LP-Gehalt
- 25 Elastizitätsmodul der Versuchsbetone
- 26 Wassereindringtiefe der Versuchsbetone
- 27 Makrofotografische Aufnahmen
- 28 Luftporenkennwerte im Frisch- und Festbeton
- 29 Ergebnisse der Kriech- und Schwindversuche
- 30 -31 Kriechkurven in doppel-logarithmischem Maßstab
- 32 -33 Schwindkurven in doppel-logarithmischem Maßstab
- 34 Auswertung der Betondruckfestigkeit β_{W28}
- 35 Streubereiche der Fließbetondruckfestigkeiten β_{W28}
in Abhängigkeit von der Nullbetondruckfestigkeit
(5-% und 95 %-Fraktile-Werte)

Anlage 1

Zusammensetzung der Fließ und Nullbetone der Serie 1
(Berechnete Ist-Zusammensetzung, Soll-Zusammensetzung siehe Tabelle 5)

Beton Nr.	Zement- gehalt	W/Z- Wert	Sieb- linie ¹⁾	Mehlkorn- anteil	LP- Gehalt	Frischbeton- rohdichte
-	kg/m ³	-	-	kg/m ³	Vol-%	kg/dm ³
1.1 A	360	0,43	1a	397	4,4	2,40
1.1 B	350	0,46	1a	387	3,7	2,37
1.1 C1	365	0,46	1a	402	3,0	2,39
1.1 C2	366	0,41	1a	403	5,2	2,35
1.1 N1	354	0,48	1a	391	4,4	2,33
1.1 N2	366	0,42	1a	403	3,8	2,38
1.2 A	361	0,45	2a	398	4,6	2,36
1.2 B	346	0,45	2b	383	6,0	2,30
1.2 C	356	0,45	2a	393	4,8	2,35
1.2 N	355	0,45	2b	392	4,0	2,36
1.3 A1	392	0,38	1a	428	5,2	2,33
1.3 A2	391	0,38	1a	427	5,8	2,34
1.3 B1	408	0,39	1a	444	4,5	2,34
1.3 B2	410	0,36	1a	446	3,9	2,38
1.3 B3	406	0,37	1a	442	3,6	2,42
1.3 C1	419	0,39	1a	453	2,9	2,41
1.3 C2	394	0,38	1a	430	5,0	2,35
1.3 N1	410	0,36	1a	446	4,2	2,36
1.3 N2	402	0,36	1a	438	4,2	2,38
1.3 N3	402	0,36	1a	438	4,6	2,35
1.4 A	411	0,40	2a	447	3,7	2,38
1.4 B	394	0,38	2b	430	4,7	2,35
1.4 C1	411	0,37	2a	447	4,5	2,37
1.4 C2	408	0,37	2a	444	4,3	2,38
1.4 C3	398	0,38	2b	434	4,5	2,36
1.4 N1	408	0,37	2a	444	4,6	2,38
1.4 N2	398	0,38	2b	434	3,5	2,38
1.5 A	368	0,44	1b	405	2,0	2,48
1.5 B	355	0,42	1b	392	5,5	2,36
1.5 C1	367	0,44	1b	404	1,8	2,47
1.5 C2	351	0,46	1b	388	5,3	2,38
1.5 N	354	0,43	1b	391	5,1	2,37
1.6 A	365	0,44	2c	402	3,0	2,47
1.6 B	355	0,44	2c	392	6,0	2,35
1.6 C	360	0,44	2c	397	4,9	2,41
1.6 N	355	0,43	2c	392	5,0	2,36

1) siehe Fußnote Anlage 2

Anlage 2

Zusammensetzung der Fließ- und Nullbetone der Serie 2
(Berechnete Ist-Zusammensetzung)

Beton Nr.	Zement- gehalt	W/Z- Wert	Sieb- linie ¹⁾	Mehlkorn- anteil	LP- Gehalt	Frischbeton- rohdichte
-	kg/m ³	-	-	kg/m ³	Vol.-%	kg/dm ³
2.1 A1	370	0,40	1a	406	3,6	2,40
2.1 A2	370	0,40	1a'	406	6,5	2,33
2.1 N1	370	0,40	1a'	406	4,4	2,39
2.1 B1	370	0,40	1a'	406	4,2	2,37
2.1 N2	370	0,40	1a'	406	3,9	2,38
2.1 C1	374	0,41	1a'	410	4,9	2,34
2.1 N3	377	0,40	1a'	414		2,40
2.2 A1	370	0,40	2b	406	5,0	2,34
2.2 W1	371	0,40	2c	407	5,6	2,36
2.2 N1	375	0,40	2b	411	3,5	2,40
2.2 B1	374	0,40	2b	410	4,5	2,37
2.2 N2	374	0,40	2b	410	4,3	2,37
2.2 C1	374	0,40	2b	410	4,6	2,36
2.2 C2	372	0,41	2c	408	5,6	2,35
2.2 W2	371	0,40	2c	407	6,7	2,34
2.2 N3	374	0,39	2c	410	3,7	2,41

1) Erklärung der Sieblinien

1a: Stetige Sieblinie mit 24 % Sand und Oker-Splitt

1a': Stetige Sieblinie mit 32 % Sand und Oker-Splitt

1b: Stetige Sieblinie mit 24 % Sand und Diabas-Splitt

2a: Ausfallkörnung mit 68 % Oker-Splitt 8/22

2b: Ausfallkörnung mit 34 % Oker-Splitt 8/22 u. 34 % Kies 8/16

2c: Ausfallkörnung mit 34 % Diabas-Splitt 8/22 und 34 % Kies 8/16

Konsistenz der Versuchsbetone - Serie 1 -

Beton Nr.	Ausgangsbeton				FM- Dosie- rung	Fließbeton			Beton- tempe- ratur 3)
	$t = 0$ $a_{04}^{1)}$	V_0	$t = 30 \text{ min}$ a_{30}	V_{30}		a_0^F	$a_0^F - a_{30}^F$	$\frac{a_0^F - a_{30}^F}{(FM)}^{2)}$	
-	cm	-	cm	-	%	cm	cm	cm/1 kg·m ⁻³	° C
1.1 A	38	-	36	-	1,7	58	22	3,70	19
1.1 B	31	-	29	-	1,5+0,2	52	23	3,87	18
1.1 C1	40	-	(38)	1,06	1,5	54	16	3,05	
1.1 C2	38	1,16	33	-	1,75	59	26	4,24	21
1.2 A	38	-	36	-	1,5	65	29	5,52	
1.2 B	38	1,04	36	-	1,0+0,5	56	20	3,81	20
1.2 C	40	-	38	-	1,5	58	20	3,81	
1.3 A1	34	1,29	(32)	1,29	2,0+0,3	55	23	2,56	16
1.3 A2	32	1,30	-	-	2,0+0,5	55	23	2,36	19
1.3 B1	-	1,28	(27)	1,31	2,8	65	38	3,48	
1.3 B2	32	1,25	30	-	2,0	57	27	3,46	14
1.3 B3	(35)	1,37	32	-	2,0+0,5	57	25	2,56	19
1.3 C1	(32)	1,20	(30)	-	2,0	65	35	4,49	17
1.3 C2	32	1,25	28	-	2,0	59	31	3,97	20
1.4 A	36	1,14	32	-	2,0	63	31	3,97	16
1.4 B	33	1,24	(30)	1,32	1,5	66	36	6,15	17
1.4 C1	31	1,20	(29)	-	2,0	55	26	3,33	
1.4 C2	28	1,32	(27)	1,34	2,0+0,3	58	31	3,46	19
1.4 C3	31	1,35	(29)	-	2,0+0,2	55	26	3,03	17
1.5 A	(34)	1,15	(32)	1,16	1,75+0,5	51	19	2,41	19
1.5 B	34	1,09	32	1,14	1,75	53	21	3,43	17
1.5 C1	32	1,17	(30)	-	1,75	45	15	2,45	19
1.5 C2	-	-	35	1,08	1,75	54	19	3,10	20
1.6 A	31	1,15	30	-	2,0	53	23	3,29	17
1.6 B	32	1,16	(30)	-	1,75	50	23	3,76	18
1.6 C	35	1,09	32	1,15	2,0	58	26	3,71	18

Fußnoten siehe Anlage 4

Konsistenz der Versuchsbetone der Serie 2

Beton	Ausgangsbeton				FM-Dosierung	Fließbeton			Beton-temperatur 3)
	t = 0 a ₀ ¹⁾	V ₀	t = 30 a ₃₀	V ₃₀		a ₀ ^F	a ₀ ^F - a ₃₀	$\frac{a_0^F - a_{30}^F}{(FM)}$ 2)	
-	cm	-	cm	-	%	cm	cm	cm/kg · m ⁻³	° C
2.1 A1		1,35	(24)	1,40	2,0+1,0	56	32	2,88	17
2.1 A2	28	1,32	(26)	1,34	2,75	58	32	3,14	11
2.1 B	-	1,37	(24)	1,38	2,75	42	18	1,77	19
2.1 C	31	1,15	28	1,25	2,0	43	15	2,03	19
2.2 A	28	1,31	26	-	2,75	57	31	3,05	20
2.2 B	28	1,28	-	1,33	2,75	54	28	2,75	19
2.2 C1	27	1,29	-	1,33	2,2	52	27	3,31	19
2.2 C2	27	1,25	-	1,29	2,0	53	28	3,78	21
2.2 W1	25	1,33	25	1,38	1,5+0,5	46	21	2,83	22
2.2 W2	28	1,29	28	1,31	1,5+0,5	58	30	4,05	20

- 1) a₀, V₀ : Ausbreit- und Verdichtungsmaß unmittelbar nach dem Mischen
a₃₀, V₃₀ : Ausbreit- u. Verdichtungsmaß 30 Min. nach dem Mischen
a₀^F : Ausbreitmaß des Fließbetons unmittelbar nach FM-Zugabe
- 2) Wirksamkeit des Fließmittels : Ausbreitmaßerhöhung bezogen auf 1 kg FM pro 1 m³ Beton
- 3) Betontemperatur bei FM-Zugabe

Die in Klammern gesetzten Ausbreitmaße konnten wegen unzureichendem Zusammenhaltevermögens nicht bestimmt werden.

Die angegebenen Werte wurden mit Hilfe des Verdichtungsmaßes im Vergleich zu ähnlichen Betonen interpoliert.

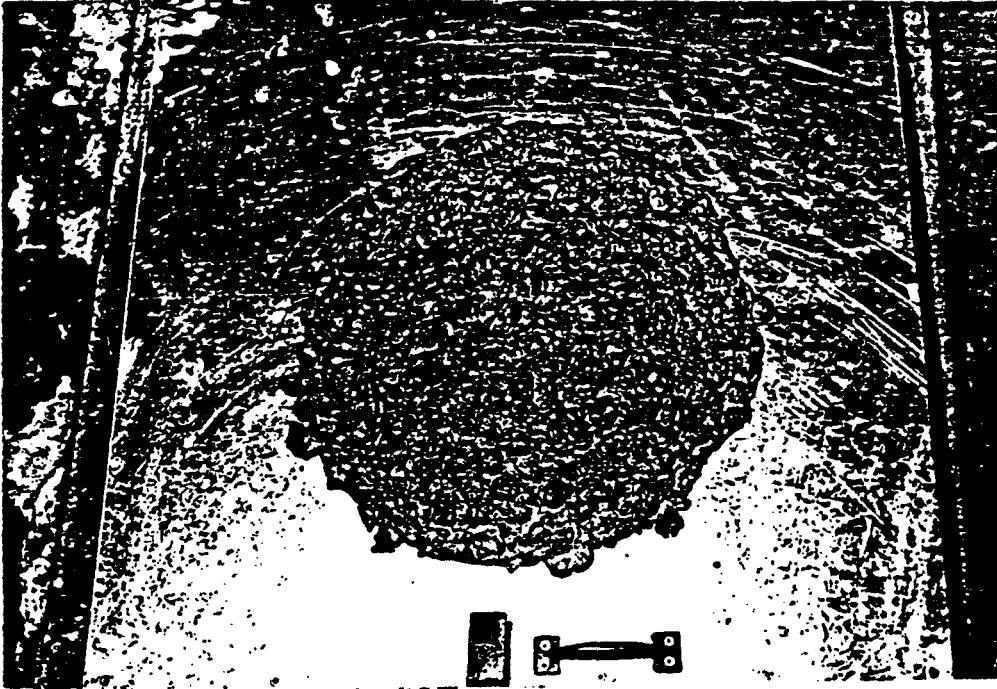


Bild 1: Beton 1.1 A, Ausgangsbeton $a_{30} = 36 \text{ cm}$

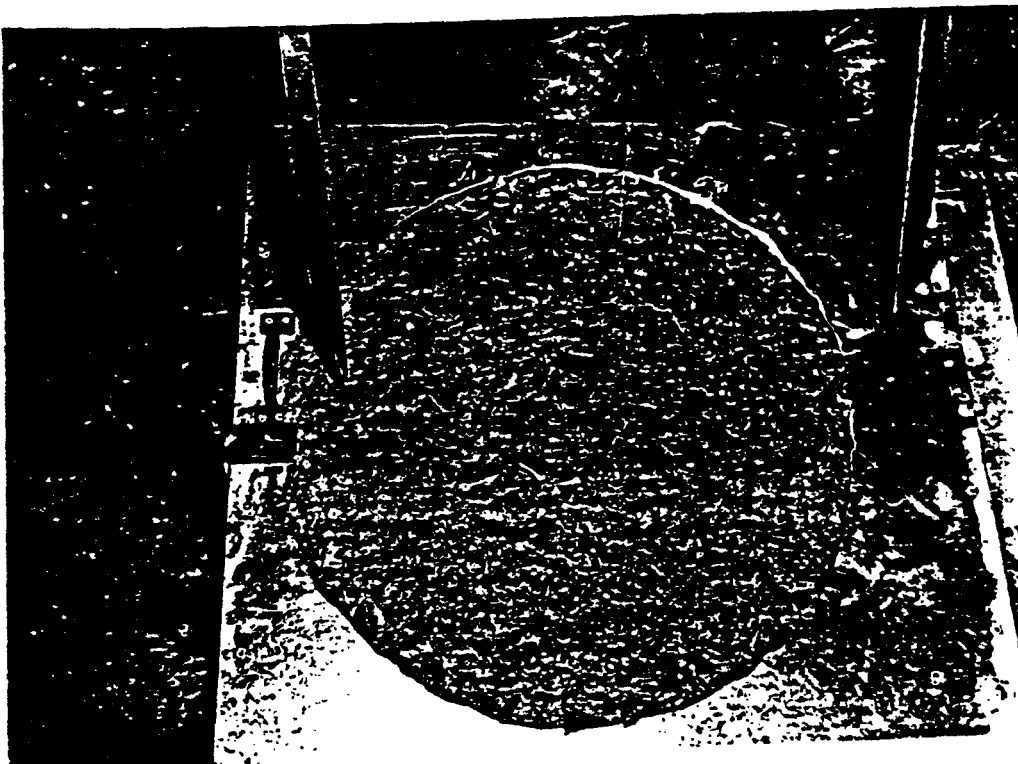


Bild 2: Beton 1.1 A, Fließbeton $a_0^F = 58 \text{ cm}$

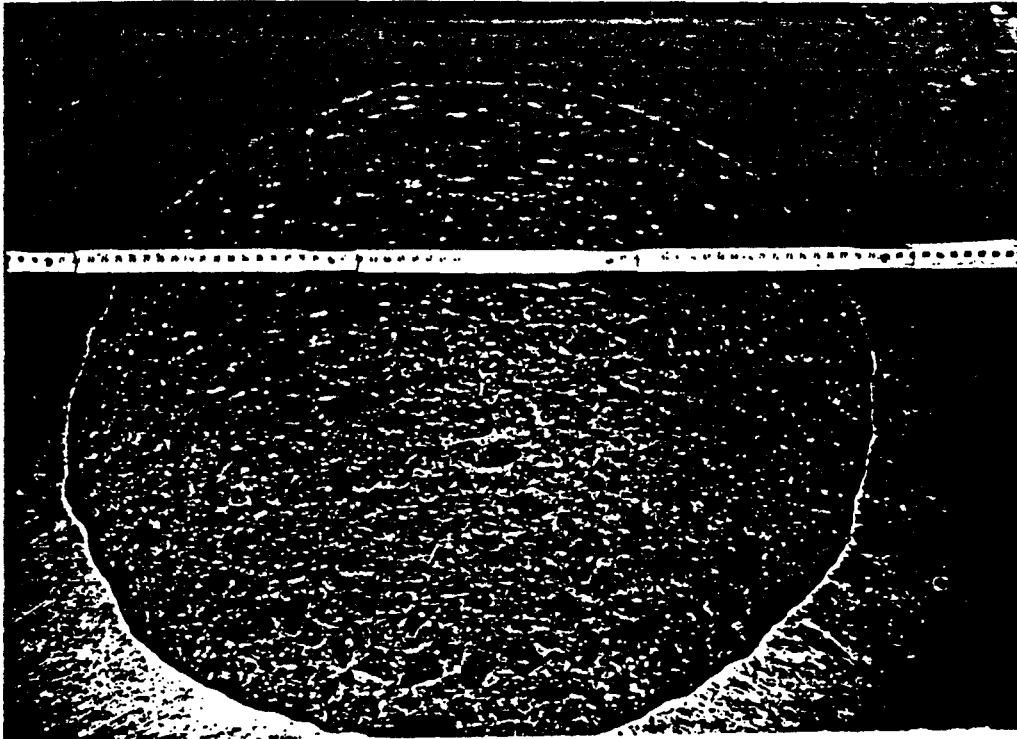


Bild 3: Beton 1.3 C2, $a_{\text{O}}^{\text{F}} = 59 \text{ cm}$

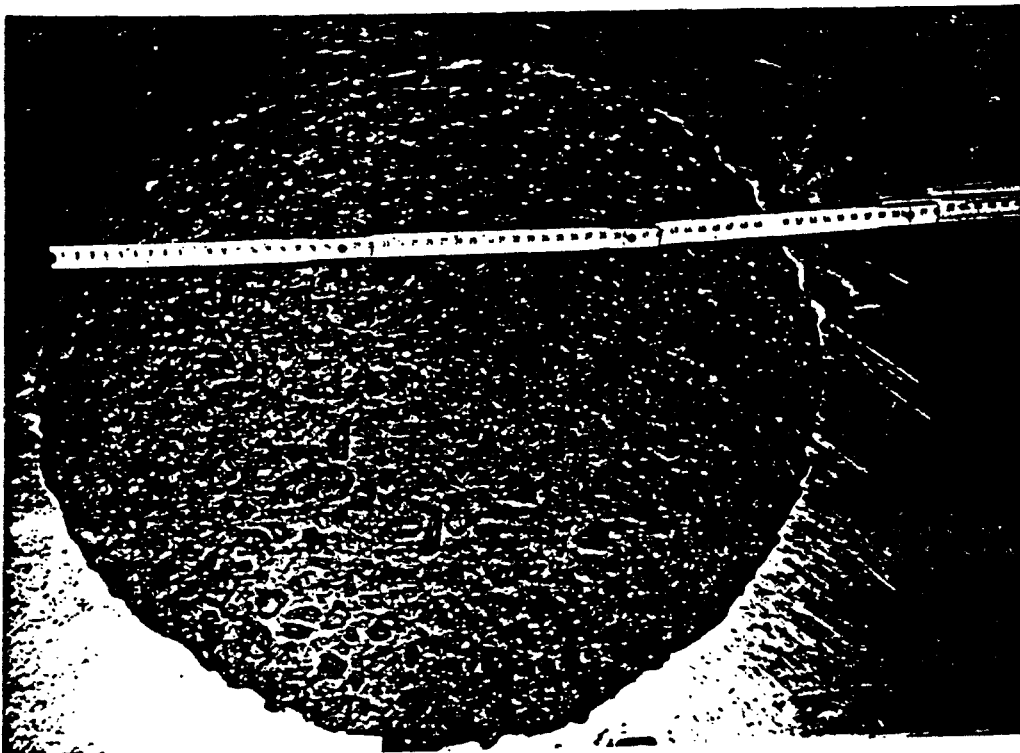


Bild 4: Beton 2.2 C2, $a_{\text{O}}^{\text{F}} = 53 \text{ cm}$

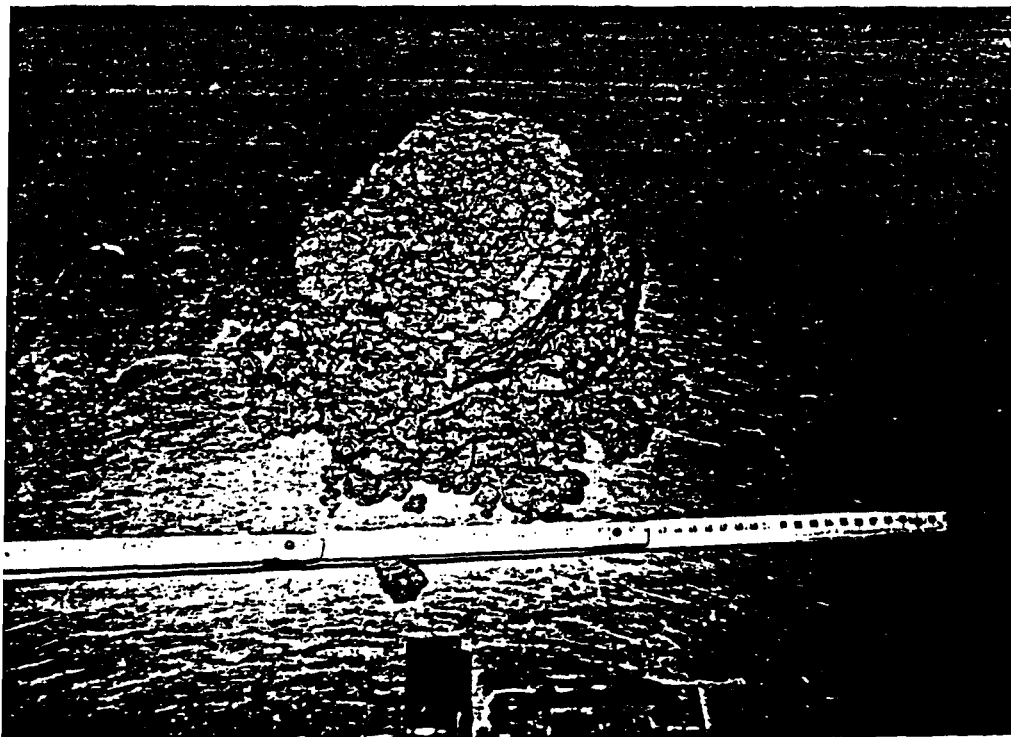


Bild 5: Beton 2.1 A2, Ausgangsbeton a_0 nicht bestimmbar,
 $V_{30} = 1,34$

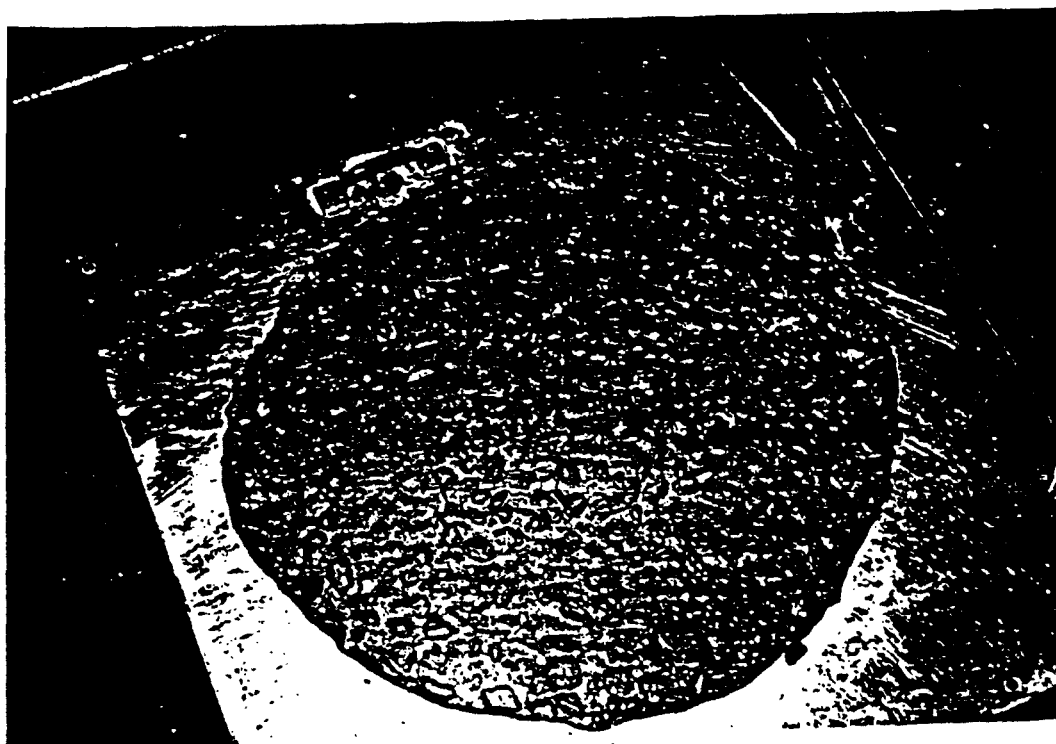
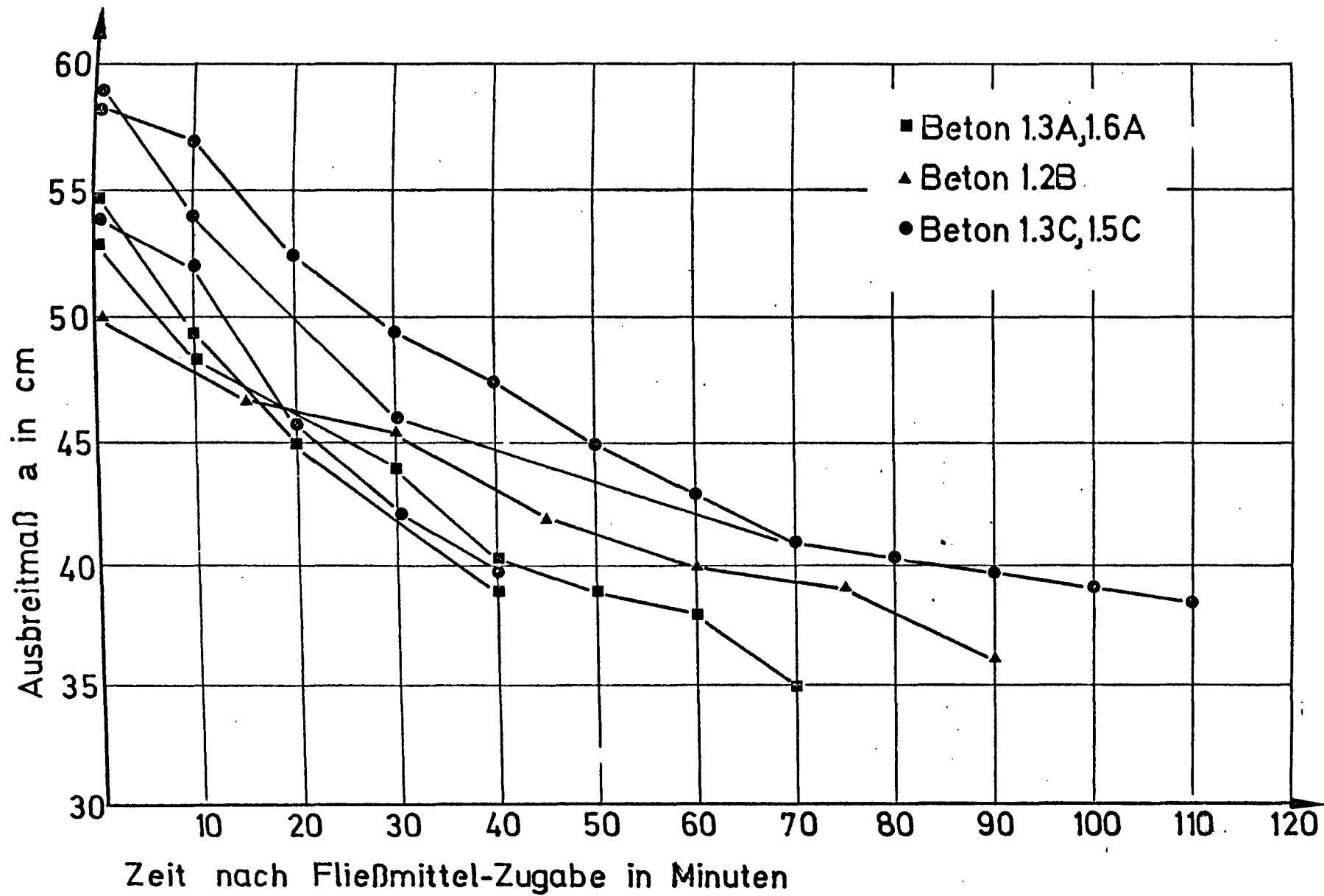
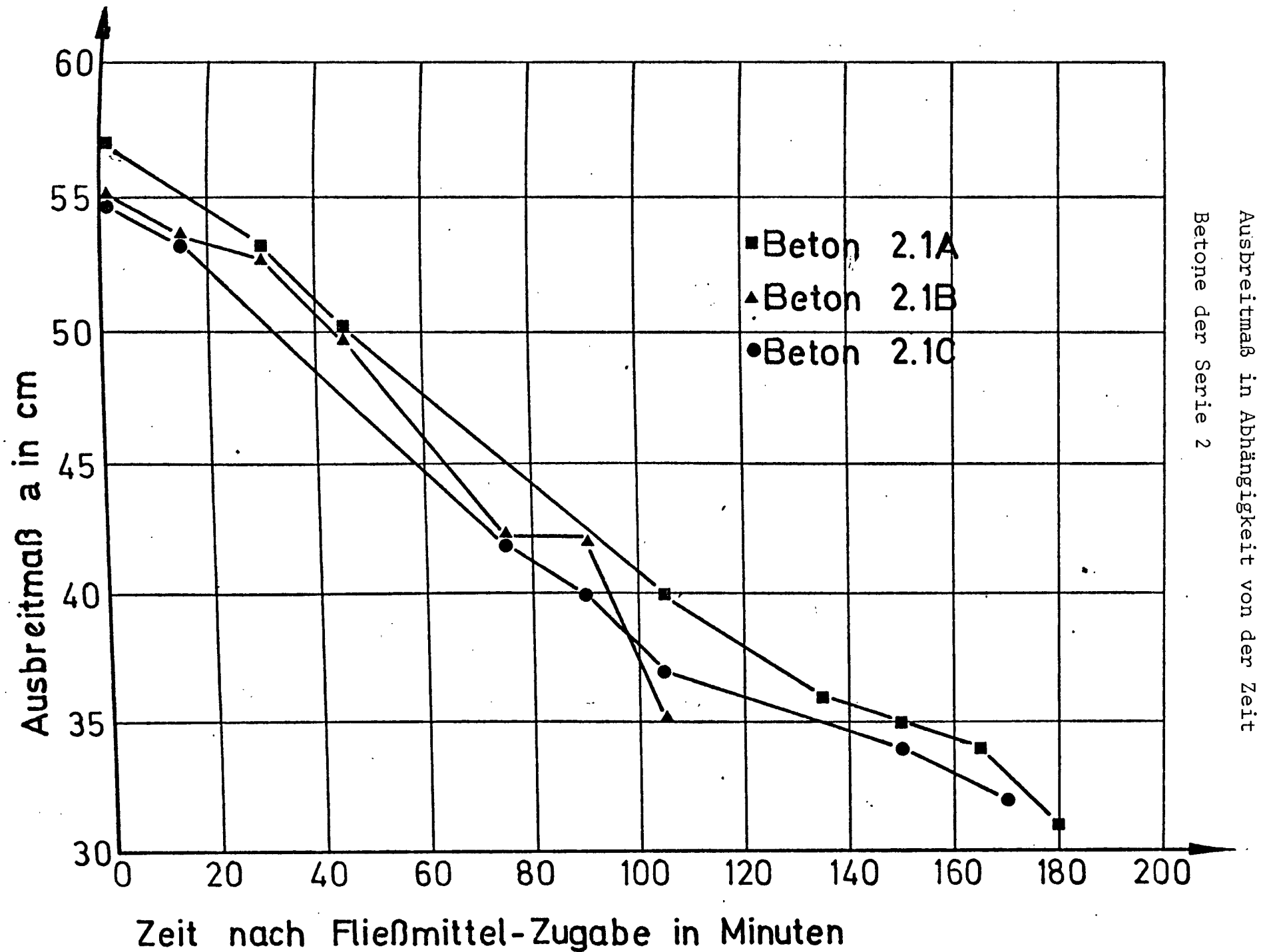


Bild 6: Beton 2.1 A2, Fließbeton mit $a_0^F = 58 \text{ cm}$



Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der Zeit - Betone der Serie 1 -



Luftporengehalt und Frischbetonrohddichte der Versuchsbetone der Serie 1

Beton Nr.	LP-Mittel-Dosierung	Ausgangsbeton		Fließbeton			$p^F:p^A$
		p^A	$\rho_{b,h}^{1)}$	p^F	$\rho_{b,h}^{1)}$	$\rho_{b,h}^{2)}$	
-	% V. Z.	Vol.-%	kg/dm ³	Vol.-%	kg/dm ³	kg/dm ³	-
1.1 A	0,03	4,4	2,43	4,4	2,90	2,38	1,00
1.1 B	0,02	4,8	2,33	3,7	2,37	2,33	0,77
1.1 C1	0,025	3,8	2,36	3,0	2,39	2,40	0,79
1.1 C2	0,04	5,6	2,42	5,2	2,35	2,42	0,93
1.1 N1	0,025	4,4	-	-	2,33	2,35	-
1.1 N2	0,03	3,8	2,38	-	2,38	2,41	-
1.2 A	0,03	4,5	2,34	4,6	2,36	2,39	1,02
1.2 B	0,02	5,7	2,32	6,0	2,30	2,29	1,05
1.2 C	0,03	4,6	2,40	4,8	2,35	2,38	1,04
1.2 N	0,045	4,0	2,41	-	2,36	2,38	-
1.3 A1	0,05	4,0	2,37	5,2	2,33	2,34	1,30
1.3 A2	0,075	4,6	2,36	5,8	2,34	2,34	1,26
1.3 B1	0,02	4,9	2,33	4,5	2,34	2,39	0,92
1.3 B2	0,025	4,4	2,34	3,9	2,38	2,41	0,89
1.3 B3	0,04	3,7	2,41	3,6	2,42	2,44	0,97
1.3 C1	0,04	3,8	2,36	2,9	2,41	2,46	0,76
1.3 C2	0,065	4,7	2,34	5,0	2,35	2,34	1,06
1.3 N1	0,025	4,7	2,34	-	2,36	2,46	-
1.3 N2	0,03	4,2	2,38	-	2,38	2,39	-
1.3 N3	0,065	4,6	-	-	2,35	2,38	-
1.4 A	0,04	4,4	2,36	3,7	2,38	2,42	0,84
1.4 B	0,03	5,1	2,32	4,7	2,35	2,36	0,92
1.4 C1	0,03	4,5	2,42	4,5	2,37	2,42	1,00
1.4 C2	0,07	4,2	2,36	4,3	2,38	2,43	1,02
1.4 C3	0,075	4,6	2,35	4,5	2,36	2,38	0,98
1.4 N1	0,07	4,6	-	-	-	2,45	-
1.4 N2	0,075	3,5	2,38	-	2,38	2,38	-
1.5 A	0,025	3,3	2,45	2,0	2,48	2,50	0,61
1.5 B	0,02	4,7	2,37	5,5	2,36	2,39	1,17
1.5 C1	0,025	3,3	2,40	1,8	2,47	2,48	0,55
1.5 C2	0,05	4,3	2,38	5,3	2,38	2,42	1,23
1.5 N	0,02	5,1	2,37	-	2,37	2,37	-
1.6 A	0,025	3,5	2,42	3,0	2,47	-	0,86
1.6 B	0,015	5,2	2,36	6,0	2,35	2,39	1,15
1.6 C	0,06	5,0	2,36	4,9	2,41	2,42	0,98
1.6 N	0,02	5,0	2,38	-	-	2,39	-

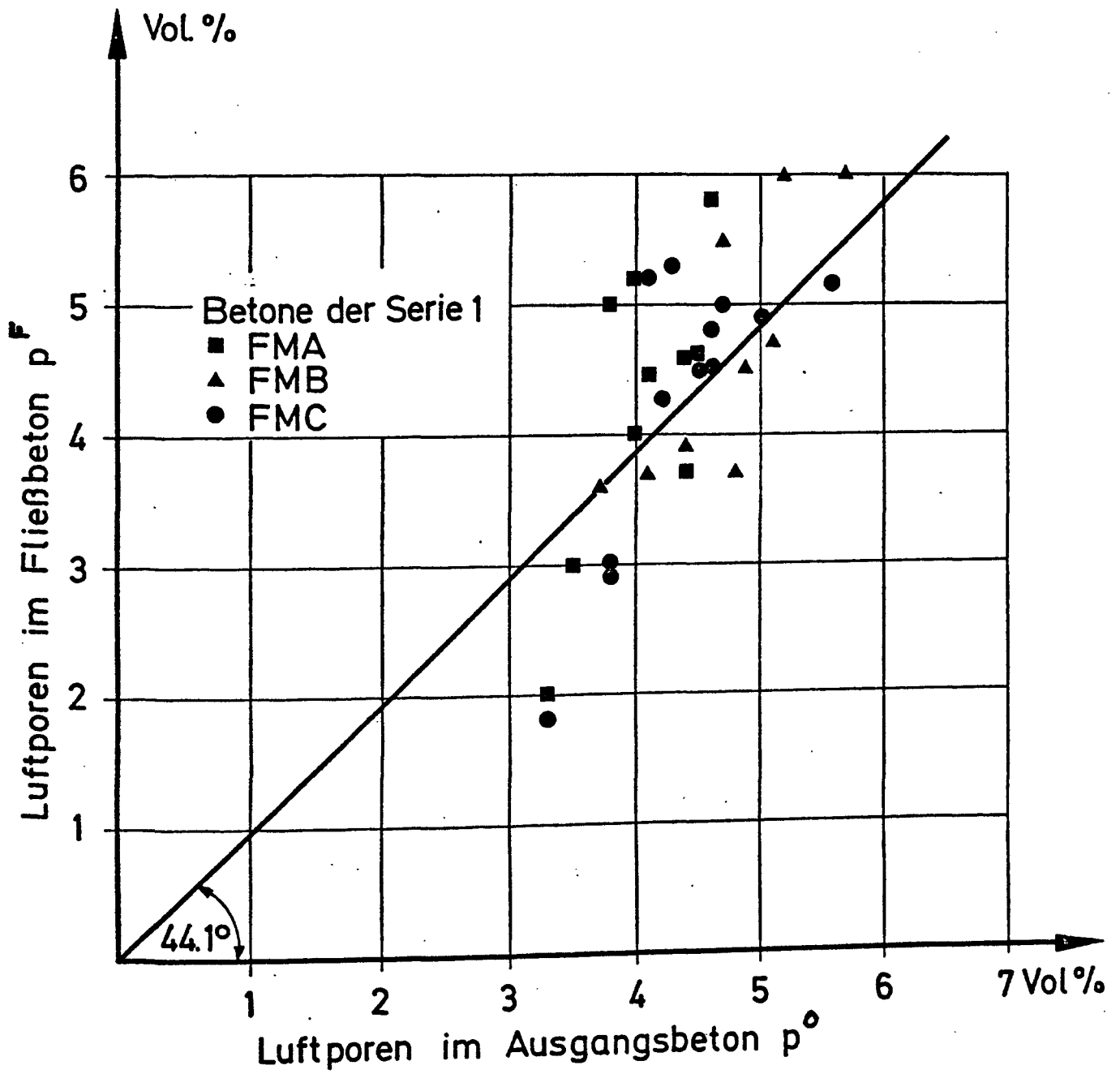
1) Rohddichte im Drucktopf

2) Rohddichte in der Würfelform

Anlage 11

Luftporengehalt und Frischbetonrohddichte der Versuchsbetone
der Serie 2

Beton Nr.	LP-Mittel Dosierung	Ausgangsbeton		Fließbeton			$p^F : p^A$
		p^A	$\rho_{b,h}$	p^F	$\rho_{b,h}$ (Würfel)	$\rho_{b,h}$ (Drucktpf)	
-	% V Z	Vol.-%	kg/dm ³	Vol.-%	kg/dm ³	kg/dm ³	-
2.1 A1	0,07 A	2,8	2,36	3,6	2,43	2,40	1,29
2.1 A3	0,07 A	4,9	2,33	6,5	2,33	2,33	1,33
2.1 NA	0,07 A	4,4	2,39	-	2,39	2,39	-
2.1 B1	0,02 B	4,3	2,37	4,2	2,42	2,37	0,98
2.1 NB	0,02 B	3,9	2,38	-	2,41	2,38	-
2.1 C1	0,07 C	5,1	2,34	4,9	2,39	2,34	0,96
2.1 NC	0,07 C	3,3	2,40	-	2,40	2,40	-
2.2 A1	0,06 A	4,5	2,36	5,0	2,34	2,34	1,11
2.2 W2	0,06	3,2	2,43	5,6	2,40	2,36	1,75
2.2 NA	0,06 C	3,5	2,40	-	2,40	2,40	-
2.2 B1	0,02	4,0	2,37	4,5	2,41	2,37	1,13
2.2 NB	0,02 B	4,3	2,37	-	2,39	2,37	-
2.2 C1	0,06	4,2	2,30	4,6	2,41	2,36	1,10
2.2 C2	0,06	4,4	2,39	5,6	2,40	2,35	1,27
2.2 W3	0,06 C	3,4	2,44	6,7	2,43	2,34	1,97
2.2 NW	0,06 C	3,7	2,41	-	2,41	2,41	-



Luftporen im Fließbeton in Abhängigkeit der Luftporen im Ausgangsbeton -Betone der Serie 1 -

Herstellen von Platten mit geneigter Oberfläche

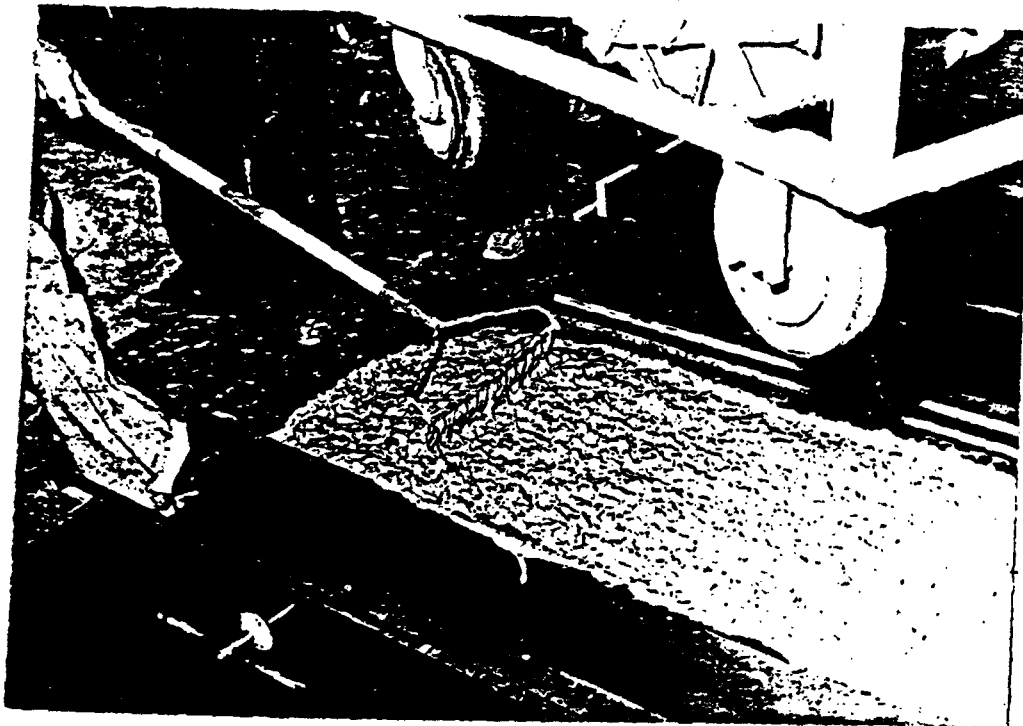


Bild 7: Verteilen und "Entlüften" eines Fließbetons ($a = 58 \text{ cm}$) mit einer Rärke (Beton 1.1 A)

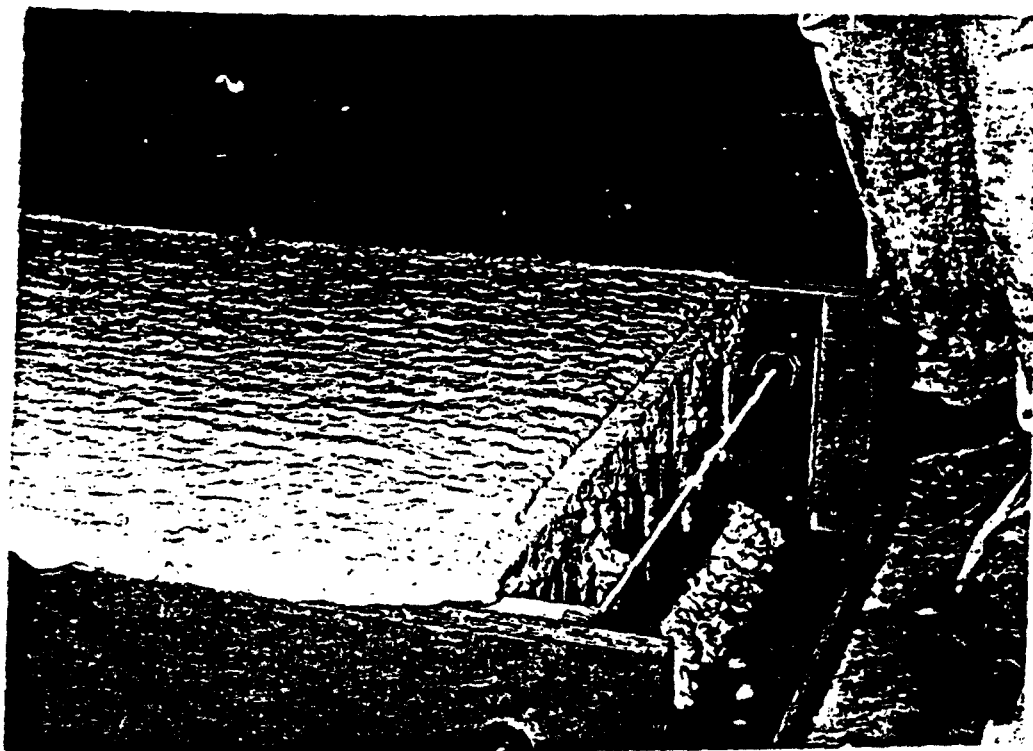


Bild 8: Platte mit 3 % Oberflächenneigung. An der unteren Seite läuft der Beton gerade noch nicht heraus.

Platten mit geneigter Oberfläche (Beton 1.1 A)

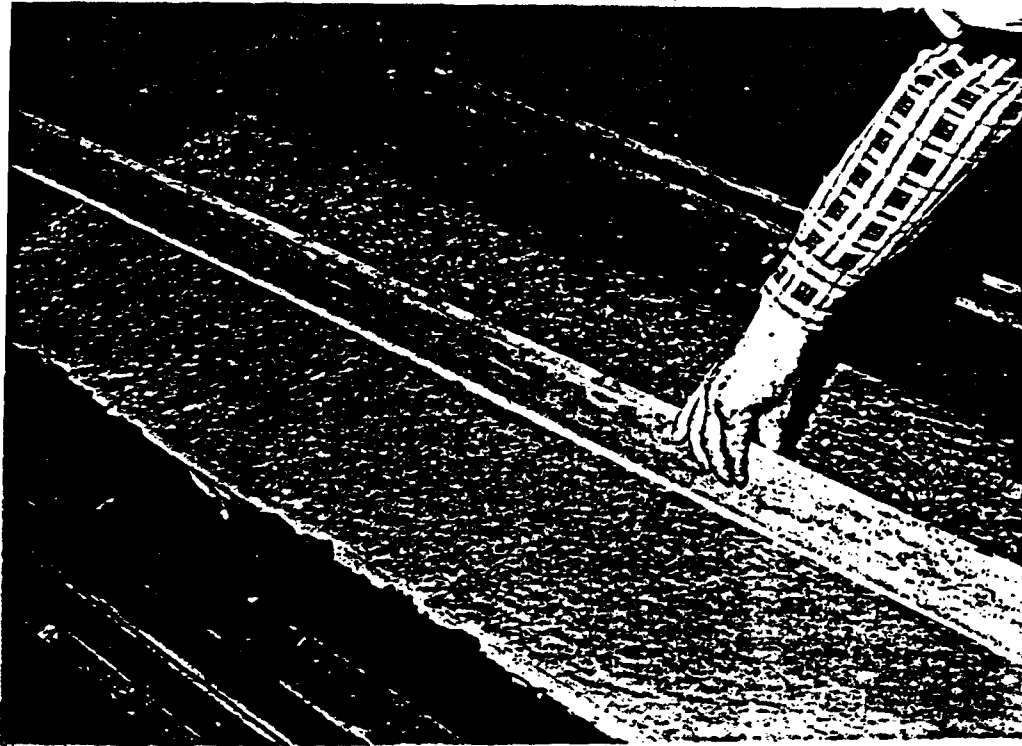


Bild 9: Abziehen der geneigten Oberfläche mit Alu-Latte
(45 Min. nach dem Betonieren)

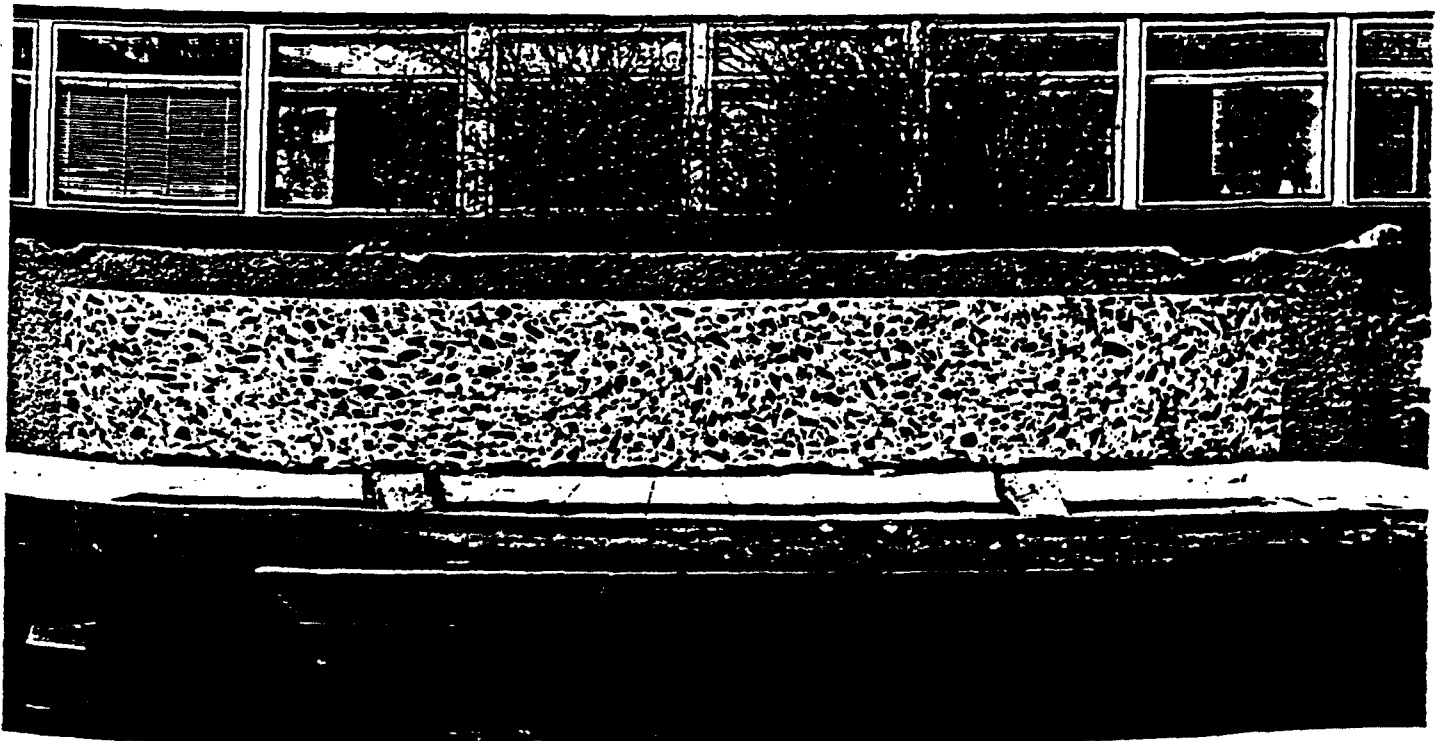


Bild 10: Schnitt durch die Platte mit 3 % Neigung von Bild 8

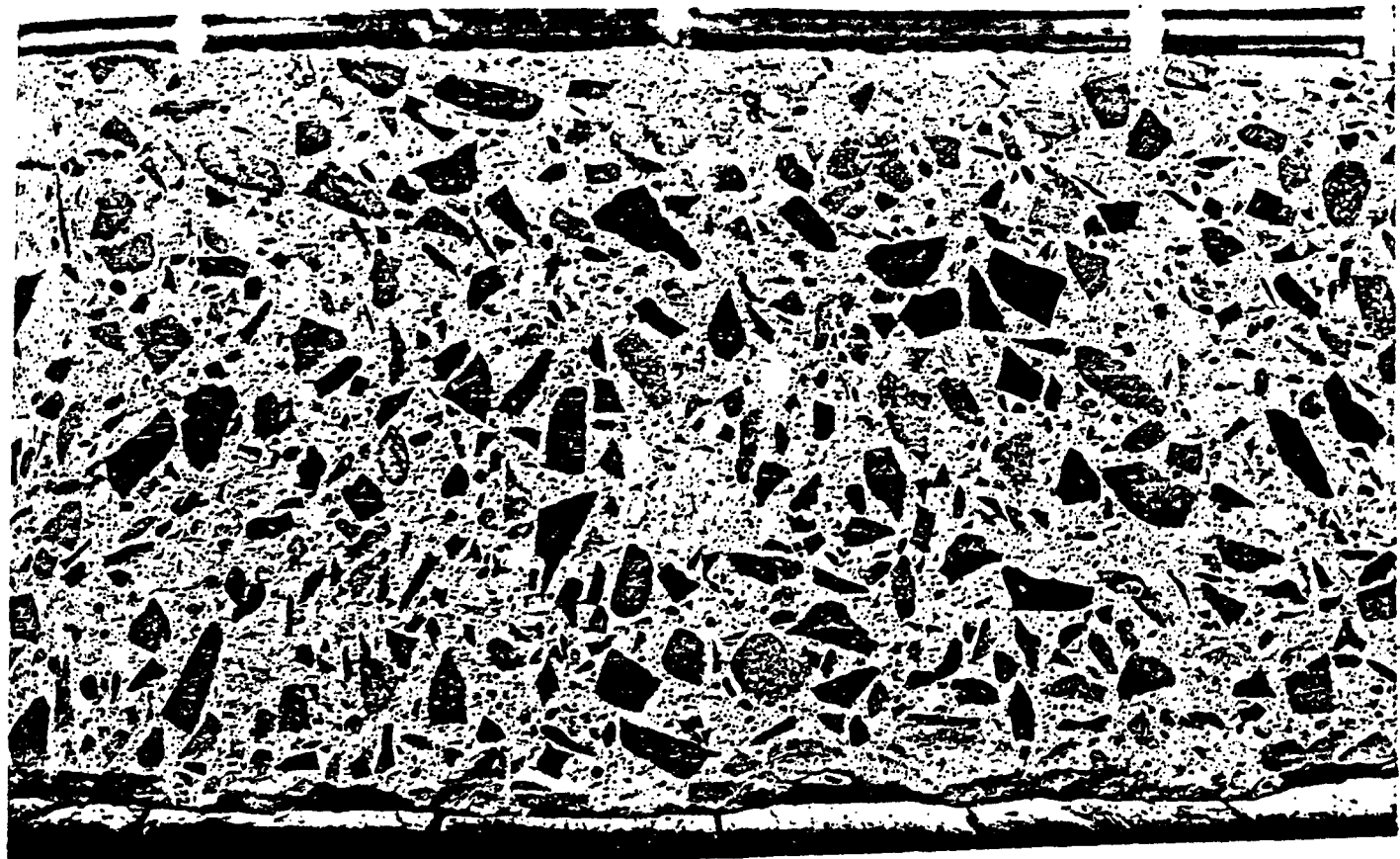


Bild 11: Platte aus Fließbeton 1,1 A (Ausschnitt aus Bild 10)



Bild 12:

Bohrkern aus einer
Platte aus Fließbeton 1.4 A

Beton	p_{b28}	p	$p^F - p^O$	β_{W2}	β_{W7}	β_{W28}	$\beta_{W28} : \beta_{W7}$	$\beta_{W7}^F : \beta_{W7}^O$	$\beta_{W28}^F : \beta_{W28}^O$
Nr.	kg/dm ³	Vol.-%	Vol.-%	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	-	-
1.1 A	2,34	4,8	0,80	-	31,0	41,6	1,34	0,91	0,95
1.1 B	2,33	4,5	0,50	19,6	32,9	45,6	1,39	0,96	1,04
1.1 C1		2,2	-1,80	-	-	47,1	-	-	1,01
1.1 C2	2,39	3,8	0,60	-	39,4	44,3	1,12	0,99	0,88
1.1 N1	2,38	4,0	-	17,4	34,1	41,8	1,29	-	-
1.1 N2	2,39	3,2	-	-	40,0	50,5	1,26	-	-
1.2 A	2,38	3,6	0	15,1	28,3	37,6	1,33	0,76	0,77
1.2 B	2,31	6,2	2,60	19,6	27,4	33,3	1,22	0,73	0,68
1.2 C1	2,35	4,2	0,60	-	33,6	43,1	1,28	0,90	0,89
1.2 N	2,35	3,6	-	22,9	37,3	48,7	1,31	-	-
1.3 A1	2,33	5,0	2,30	24,5	44,0	55,1	1,25	0,80	0,82
1.3 A2	2,31	6,0	3,30	27,8	40,9	54,2	1,33	0,94	0,97
1.3 B1	2,38	3,5	-0,50	25,6	42,2	52,0	1,23	0,92	1,02
1.3 B2	2,39	3,3	0,60	23,8	42,5	53,8	1,27	0,77	0,80
1.3 B3	2,44	3,2	-0,80	40,9	51,2	56,0	1,09	1,12	1,10
1.3 C1	2,45	1,9	-2,10	33,6	47,4	60,5	1,28	1,03	1,19
1.3 C2	2,34	4,2	0,20	29,6	44,2	56,4	1,28	1,02	1,01
1.3 N1	2,43	2,7	-	25,8	55,1	67,1	1,22	-	-
1.3 N2	2,39	4,0	-	36,0	45,8	50,9	1,17	-	-
1.3 N3	2,36	4,0	-	30,2	43,4	56,0	1,29	-	-
1.4 A	2,39	2,9	-1,20	26,3	40,0	49,6	1,24	0,82	0,80
1.4 B	2,33	4,5	1,00	20,2	38,9	52,2	1,34	0,85	0,95
1.4 C1	2,41	3,7	-0,40	28,2	44,0	57,8	1,31	0,90	0,93
1.4 C2	2,42	3,1	-1,00	39,1	51,6	68,9	1,34	1,06	1,11
1.4 C3	2,37	4,1	0,60	28,0	45,8	53,4	1,17	1,00	0,97
1.4 N1	2,42	4,1	-	33,3	48,7	62,0	1,27	-	-
1.4 N2	2,38	3,5	-	31,6	45,6	54,9	1,20	-	-
1.5 A	2,48	1,6	-3,50	26,7	45,6	58,3	1,28	1,56	1,48
1.5 B	2,36	4,9	-0,20	-	33,6	44,4	1,32	1,15	1,13
1.5 C1	2,45	1,6	-3,50	-	47,7	63,6	1,33	1,63	1,62
1.5 C2	2,40	4,5	-0,60	22,3	37,1	47,8	1,29	1,27	1,22
1.5 N	2,35	5,1	-	-	29,3	39,3	1,34	-	-
1.6 A	2,45	3,0	-1,40	-	41,6	52,9	1,27	1,12	1,16
1.6 B	2,38	5,2	0,80	-	36,0	47,1	1,31	0,97	1,03
1.6 C	2,40	4,7	0,30	-	31,6	40,0	1,27	0,85	0,88
1.6 N	2,38	4,4	-	-	37,0	45,6	1,23	-	-

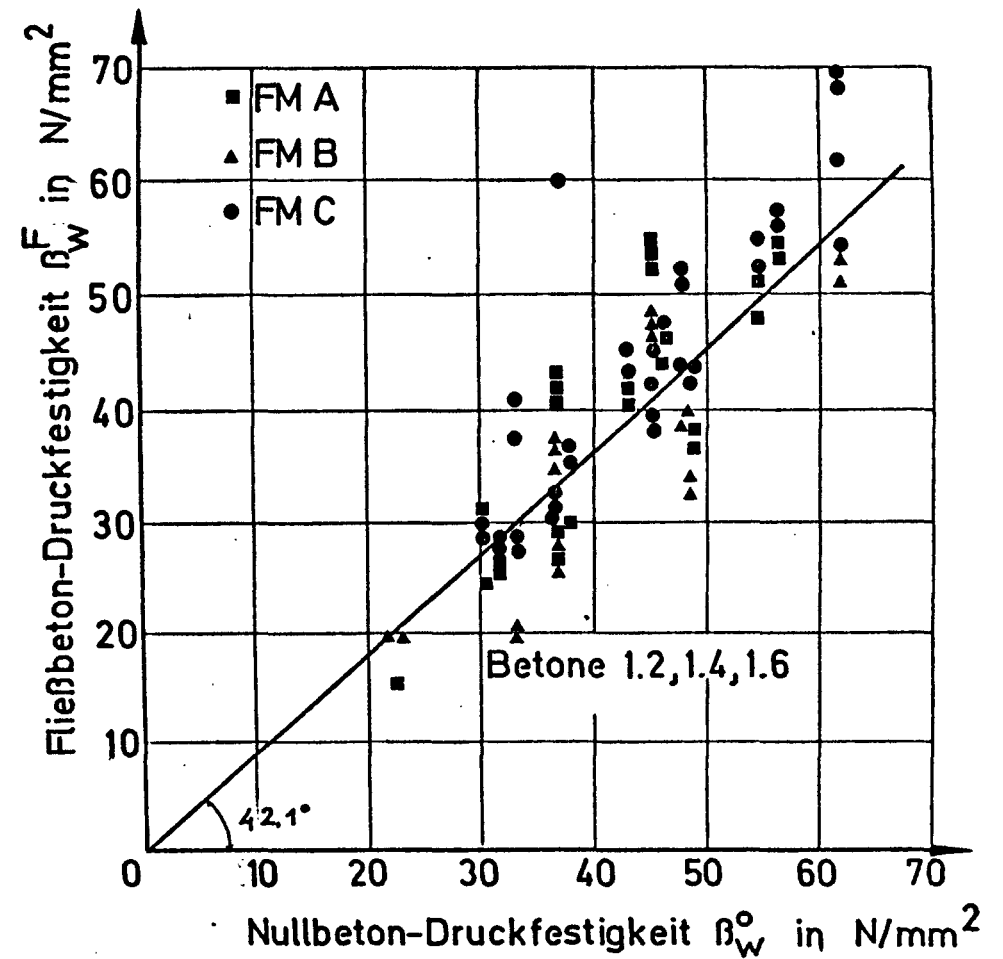
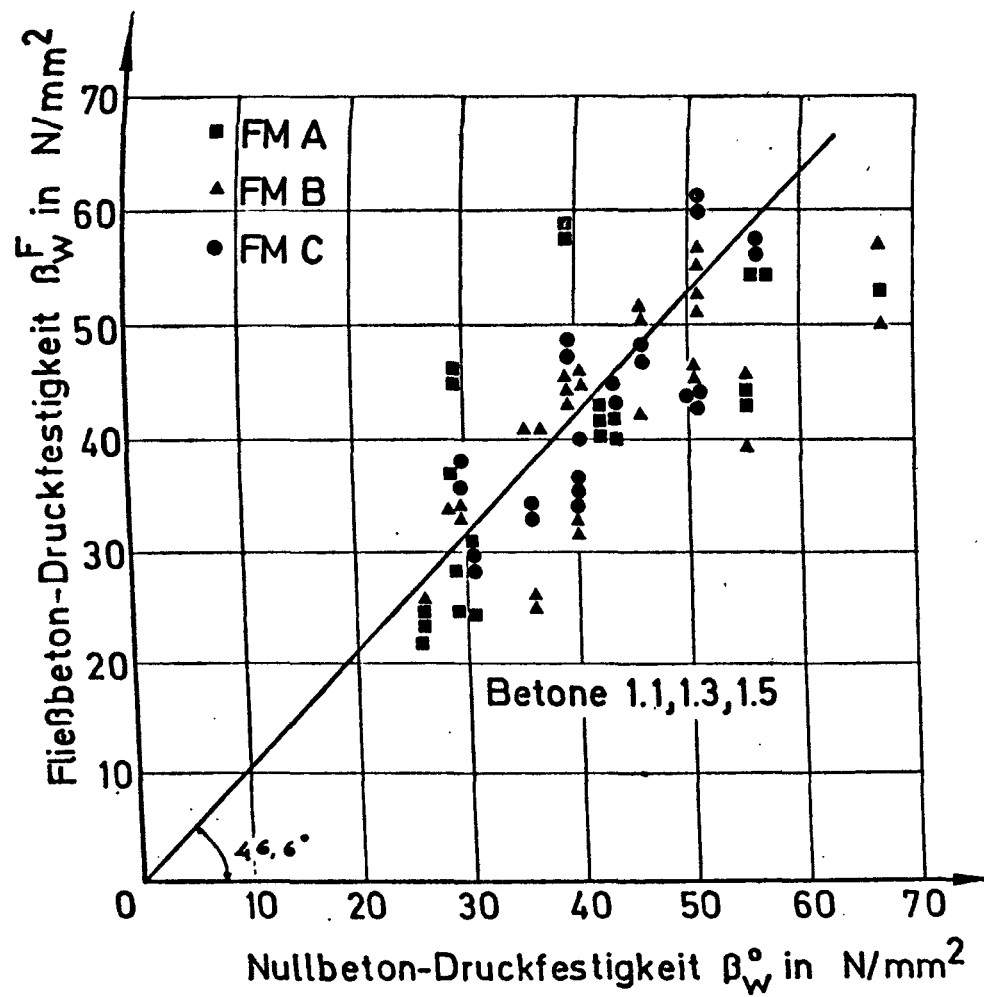
Würfeldruckfestigkeit der Versuchsbetone Serie 2

Beton Nr.	ρ_b	p	$p^F - p^O$	β_{W2}	β_{W7}	β_{W28}	$\beta_{W28} : \beta_{W7}$	$\beta_{W2}^F : \beta_{W2}^O$	$\beta_{W28}^F : \beta_{W28}^O$
-	kg/dm ³	Vol.-%	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	-	-
2.1 A1	2,42	3,0	-1,40	36,9	-	67,7	-	1,10	1,22
2.1 A3	2,32	6,5	2,10	33,3	39,8	53,6	1,35	1,00	0,97
2.1 NA	2,38	4,4	-	33,4	44,9	55,4	1,23	-	-
2.1 B1	2,41	3,2	-0,10	42,0	55,4	64,0	1,16	1,20	1,03
2.1 NB	2,39	3,3	-	34,9	52,0	62,0	1,19	-	-
2.1 C1	2,38	3,9	0,60	34,9	50,2	64,2	1,28	0,94	1,03
2.1 NC	2,39	3,3	-	37,1	49,5	62,5	1,26	-	-
2.2 A1	2,32	5,0	1,50	33,6	42,3	52,7	1,25	0,98	0,95
2.2 W1	2,41	4,8	1,30	37,3	47,8	59,4	1,24	1,09	1,07
2.2 NA	2,39	3,5	-	34,3	44,7	55,4	1,24	-	-
2.2 B1	2,39	3,7	-0,20	40,0	50,3	59,1	1,17	1,20	1,04
2.2 NB	2,39	3,9	-	33,3	47,6	56,9	1,20	-	-
2.2 C1	2,37	4,0	0,70	39,1	50,0	59,8	1,20	1,17	1,07
2.2 C2	2,40	4,4	1,10	32,9	44,7	56,6	1,27	0,99	1,02
2.2 W2	2,40	5,5	2,20	34,5	44,9	53,1	1,18	1,04	0,95
2.2 NW	2,44	3,3	-	33,1	45,4	56,0	1,23	-	-

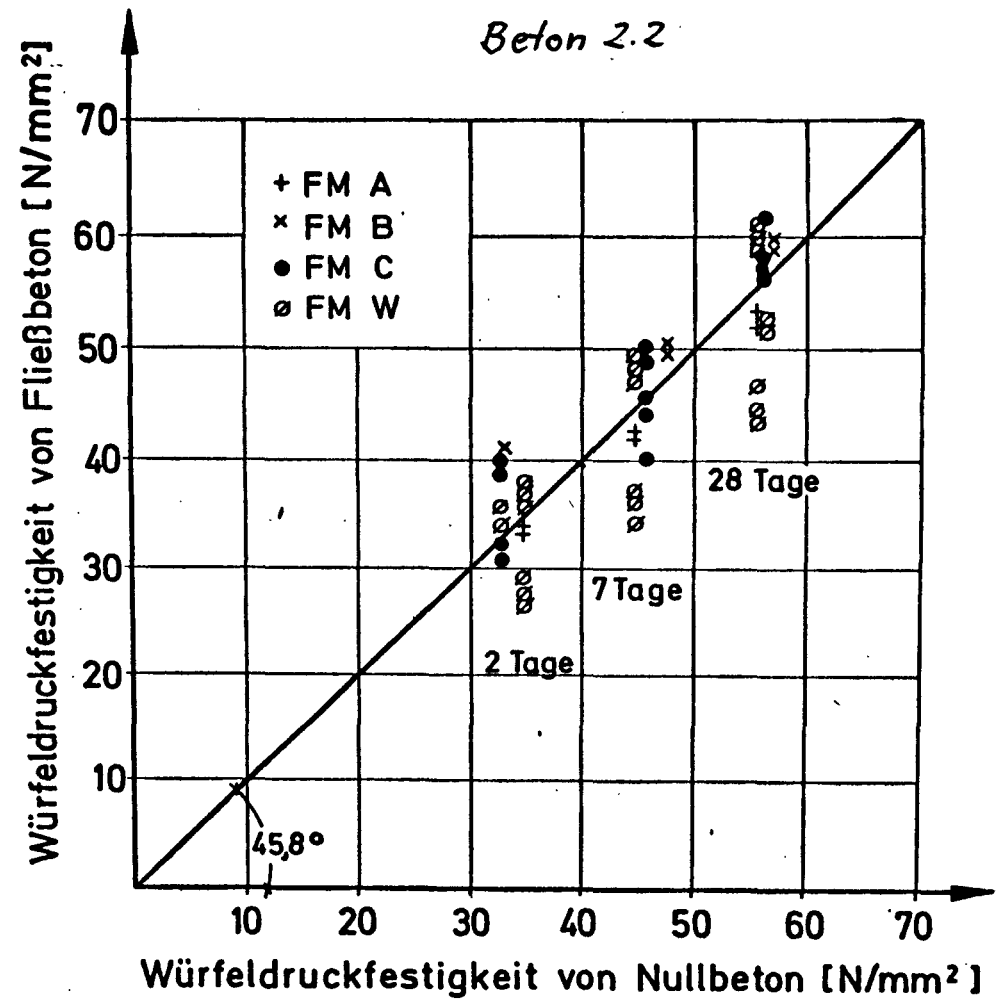
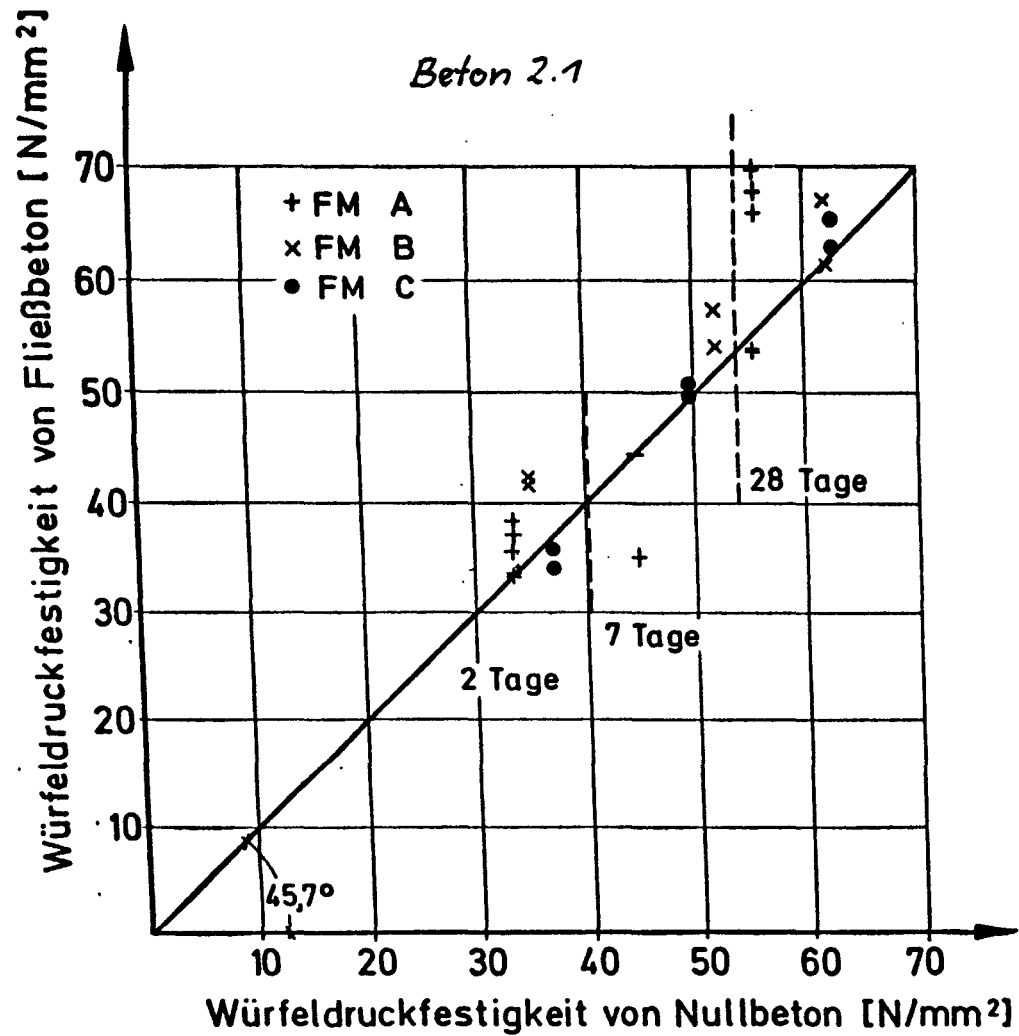
Übersichtstabelle zum Einfluß der Betonzusammensetzung auf die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit (Mittelwerte)

	Beton 1.1	Beton 1.2	Beton 1.3	Beton 1.4	Beton 1.5	Beton 1.6	Beton 2.1	Beton 2.2
β_{W2}^F N/mm ²	-	-	29,4	28,4	-	-	36,8	36,2
β_{W2}^O "	-	-	30,7	32,5	-	-	35,1	33,6
β_{W7}^F "	34,4	29,8	44,6	44,1	41,0	36,4	48,5	46,7
β_{W7}^O "	37,1	37,3	50,5	47,2	29,3	37,0	48,8	45,9
β_{W28}^F "	44,7	38,0	55,4	56,4	53,5	46,7	63,0	57,0
β_{W28}^O "	46,2	48,7	59,0	58,5	39,5	45,6	60,0	56,1
$p^F - p^O$ Vol.-%	0,0	1,1	- 0,4	- 0,2	- 1,9	- 0,1	0,3	1,1
$\beta_{W2}^F : \beta_{W2}^O$	-	-	0,95	0,87	-	-	1,05	1,07
$\beta_{W7}^F : \beta_{W7}^O$	0,92	0,79	0,88	0,93	1,39	0,98	0,99	1,01
$\beta_{W28}^F : \beta_{W28}^O$	0,97	0,78	0,94	0,96	1,36	1,02	1,05	1,02
$\beta_{W28}^F : \beta_{W7}^F$	1,27	1,27	1,24	1,22	1,30	1,28	1,29	1,21
$\beta_{W28}^O : \beta_{W7}^O$	1,27	1,30	1,17	1,23	1,34	1,23	1,23	1,22
$\beta_{W28}^F : \beta_{W2}^F$	-	-	1,88	1,98	-	-	1,70	1,56
$\beta_{W28}^O : \beta_{W2}^O$	-	-	1,91	1,79	-	-	1,71	1,66
β_{BZ}^F N/mm ²	4,78	4,65	5,64	5,22	5,86	4,79	6,75	5,27
$\beta_{BZ}^F : \beta_{BZ}^O$	0,92	0,87	0,90	1,00	0,96	1,08	1,04	1,01
c +)	0,84	0,88	0,86	0,76	0,94	0,79	0,92	0,77

$$+) \quad c = \frac{\beta_{BZ}}{\sqrt[3]{\beta_{W2}^2 \cdot 0,1}}$$

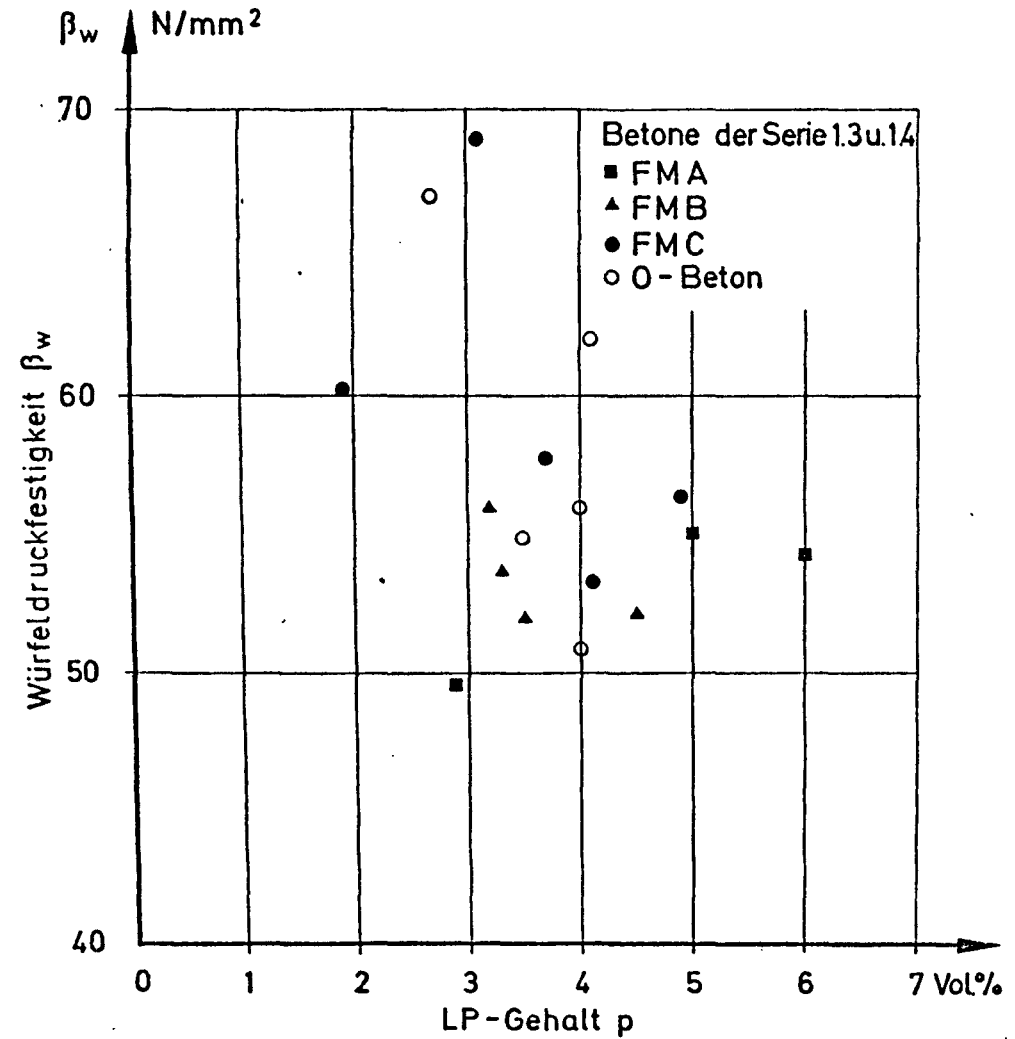
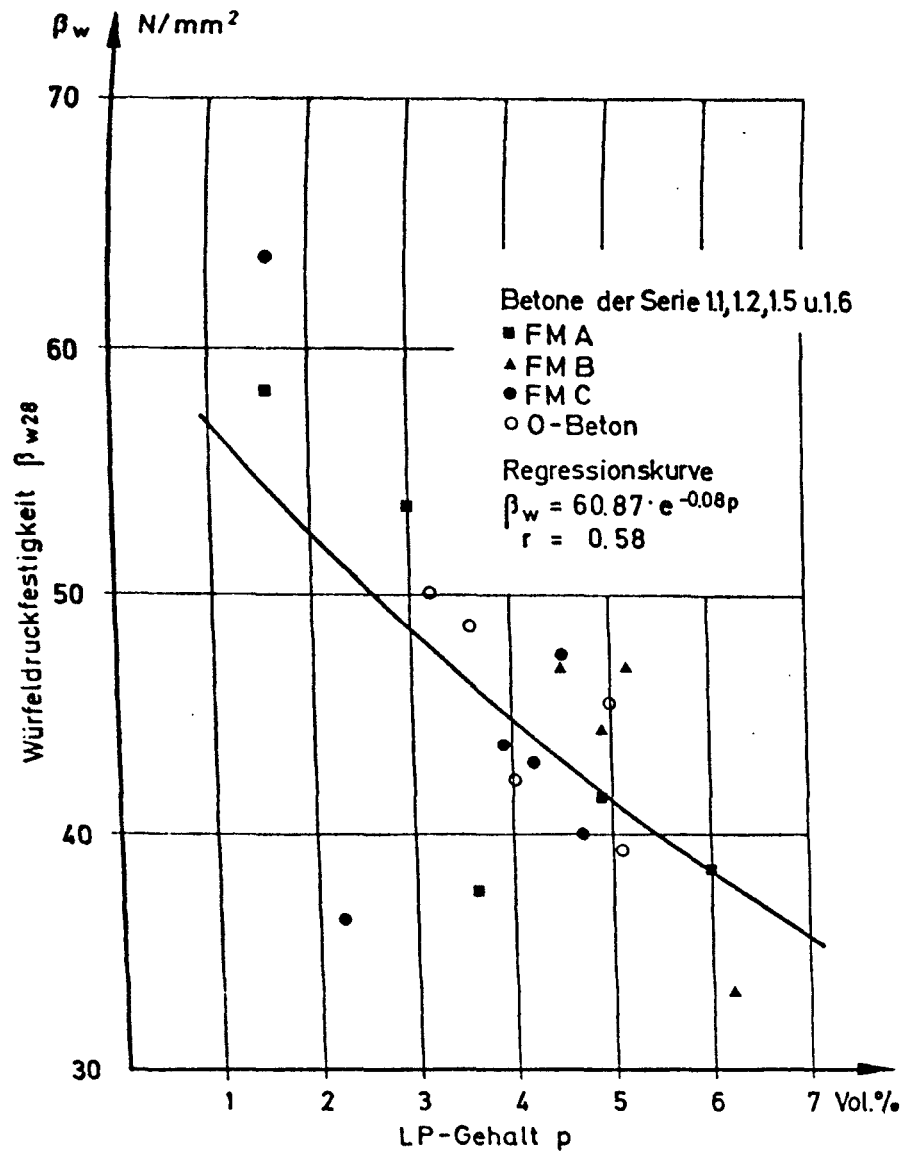


Fließbeton-Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Nullbeton-Druckfestigkeit-Serie 1-

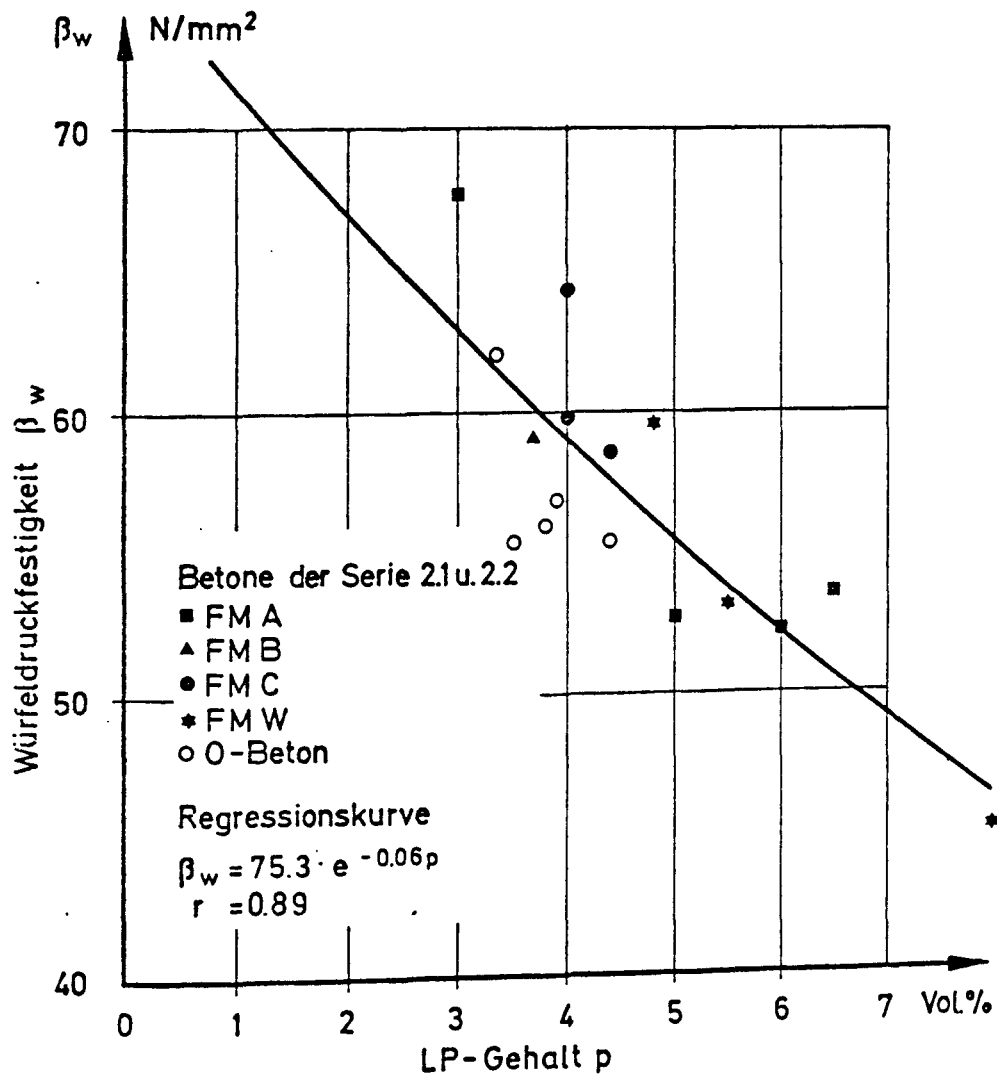


Fließbeton-Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Nullbeton-Druckfestigkeit

Betone der Serie 2



Würfeldruckfestigkeit in Abhängigkeit vom LP-Gehalt -Serie 1 -



Würfel­druck­festig­keit in Abhängig­keit vom LP-Gehalt

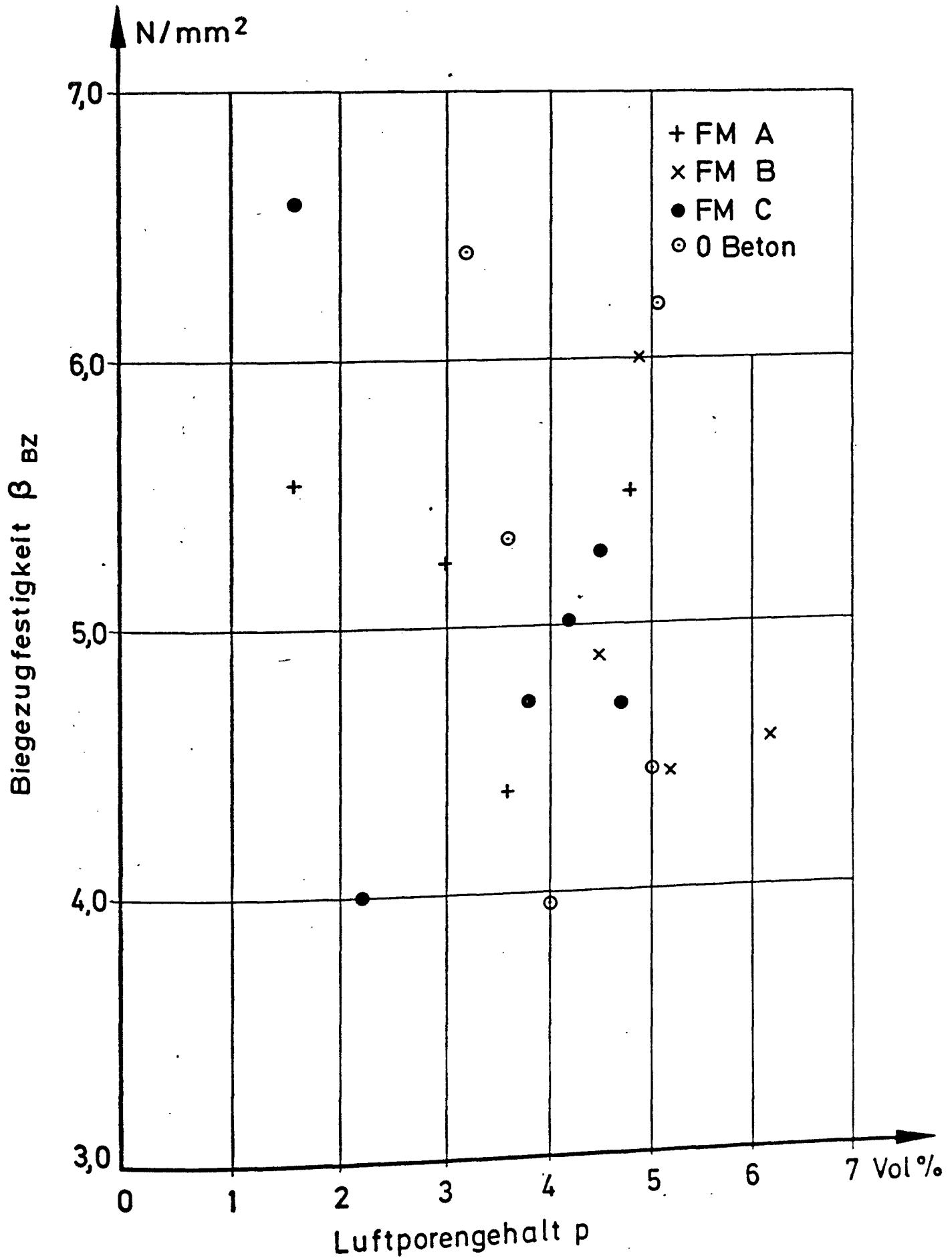
Betone der Serie 2

Anlage 23

Ergebnisse der Biegezugprüfungen nach DIN 1048, Blatt 1
 Betone der Serie 1 und 2

Beton Nr.	Rohdichte	LP-Gehalt	β_{BZ28}	β_{W28}	$c = \frac{\beta_{BZ}}{\sqrt[3]{\beta_{W28} \cdot 0,1}}$	$\frac{\beta_{BZ}^2}{\beta_{BZ}^0}$
	kg/dm ³	Vol.-%	N/mm ²	N/mm ²	-	-
1.1 A	2,30	4,2	5,50	41,6	0,99	1,39
1.1 B	2,35	4,5	4,88	45,6	0,82	1,24
1.1 C1		2,2	4,00	44,3	0,69	1,01
1.1 C2	2,36	3,8	4,72	44,3	0,81	0,74
1.1 N1	2,44	4,0	3,95	43,9	0,63	-
1.1 N2	2,38	3,2	6,40	50,5	1,01	-
1.2 A	2,39	3,6	4,38	37,6	0,84	0,82
1.2 B	2,33	6,2	4,56	33,3	0,95	0,86
1.2 C	-	4,2	5,01	43,1	0,88	0,94
1.2 N	2,34	3,6	5,33	48,7	0,86	-
1.3 A1	2,35	5,0	5,70	55,1	0,85	0,90
1.3 A2	2,30	6,0	6,25	54,2	0,94	0,92
1.3 B1	2,39	3,5	5,86	52,0	0,91	1,02
1.3 B2	2,42	3,3	5,13	53,8	0,78	0,81
1.3 B3	2,43	3,2	5,71	56,0	0,84	0,99
1.3 C1	2,44	1,9	5,40	60,5	0,76	0,94
1.3 C2	2,35	4,8	5,40	56,4	0,79	0,79
1.3 N1	2,42	2,7	6,31	67,1	0,82	-
1.3 N2	2,38	4,0	5,76	50,9	0,91	-
1.3 N3	2,34	4,0	6,81	56,0	1,00	-
1.4 A	2,41	2,9	5,30	49,6	0,85	1,00
1.4 B	2,34	4,5	4,15	52,2	0,64	0,80
1.4 C1	2,40	3,7	5,91	57,8	0,85	1,12
1.4 C2	2,43	3,1	5,57	68,9	0,71	1,05
1.4 C3	2,38	4,1	5,19	53,4	0,79	1,00
1.4 N1	2,40	4,1	5,29	62,0	0,73	-
1.4 N2	2,35	3,5	5,20	54,9	0,78	-
1.5 A	2,49	1,6	5,56	58,3	0,80	0,91
1.5 B	2,40	4,9	6,00	44,4	1,03	0,98
1.5 C1	2,46	1,6	6,59	63,6	0,89	1,08
1.5 C2	2,41	4,5	5,28	47,8	0,86	0,87
1.5 N	2,35	5,1	6,10	39,3	1,14	-
1.6 A	2,45	3,0	5,24	52,9	0,80	1,17
1.6 B	2,38	5,2	4,44	47,1	0,73	1,00
1.6 C	2,41	4,7	4,69	40,0	0,86	1,05
1.6 N	2,36	4,4	4,45	45,6	0,75	-
2.1 A1	2,40	3,0	6,6	67,7	0,86	1,06
2.1 A3	2,32	6,5	6,2	53,6	0,93	1,00
2.1 N1	2,33	4,4	6,2	55,4	0,92	-
2.1 B1	2,39	3,2	7,7	64,0	1,04	1,08
2.1 N2	2,40	3,3	7,1	62,0	0,98	-
2.1 C1	2,39	3,9	6,5	64,2	0,87	1,05
2.1 N3	2,36	3,3	6,2	62,5	0,85	-
2.2 A1	2,35	5,0	4,8	52,7	0,74	0,91
2.2 W1	2,38	4,8	6,6	59,4	0,93	1,25
2.2 N1	2,39	-	5,3	55,4	0,79	-
2.2 B1	2,41	3,7	4,6	59,1	0,65	1,09
2.2 N2	2,35	3,5	4,2	56,9	0,61	-
2.2 C1	2,38	4,0	4,4	59,8	0,62	0,72
2.2 C2	2,42	4,4	5,4	56,6	0,79	0,89
2.2 W2	2,36	5,5	5,8	53,1	0,88	0,95
2.2 N3	2,39	3,3	6,1	56,0	0,90	-

Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom LP-Gehalt
 Normalerhärtende Versuchsbetone Nr. 1.1, 1.2, 1.5 u. 1.6



Elastizitätsmodul der Versuchsbetone bei Prüfung nach DIN 1048, Bl. 2

Beton Nr.	Rohdichte p	LP-Gehalt p ^F -p ^O		β _{W28}	E ₂₈	$\frac{E_{28}^{+})}{\sqrt{\beta_W}}$	$\frac{E_{28}^F}{E_{28}^O}$
-	kg/dm ³	Vol.-%	Vol.-%	N/mm ²	kN/mm ²	-	-
1.1 A	2,33	4,8	1,6	41,6	29,9	4500	0,91
1.1 B	2,32	4,5	1,3	45,6	25,7	3810	0,80
1.1 C2	2,35	3,8	0,6	44,3	28,7	4320	0,90
1.1 N2	2,36	3,2	-	50,5	32,0	4500	-
1.2 A	2,33	3,6	0,0	37,6	27,4	4470	0,97
1.2 B	2,31	6,2	2,6	33,3	26,7	4630	0,95
1.2 C	2,33	4,2	0,6	43,1	27,4	4170	0,97
1.2 N	2,35	3,6	-	48,7	28,2	4040	-
1.3 A1	2,34	5,0	2,3	55,1	30,4	4100	0,93
1.3 B2	2,38	3,3	0,6	53,8	28,2	3840	0,87
1.3 C1	2,42	1,9	-0,8	60,5	28,0	3600	0,86
1.3 N1	2,41	2,7	-	67,1	32,6	3980	-
1.4 A	-	2,9	-1,2	49,6	28,2	4000	0,85
1.4 C2	2,43	3,1	-1,0	68,9	32,2	3880	0,97
1.4 N1	2,42	4,1	-	62,0	33,2	4220	-
1.5 A	-	1,6	-3,5	58,3	32,4	4240	1,14
1.5 B	2,38	4,9	-0,2	44,4	27,5	4130	0,97
1.5 C1	2,46	1,6	-3,5	63,6	30,8	3860	1,08
1.5 C2	-	4,5	-0,6	47,8	30,2	4370	1,06
1.5 N	2,34	5,1	-	39,3	28,4	4530	-
1.6 A	2,45	3,0	-1,4	52,9	32,2	4430	1,07
1.6 B	2,38	5,2	0,8	47,1	31,8	4630	1,06
1.6 C	2,39	4,7	0,3	40,0	29,9	4730	0,99
1.6 N	2,34	4,4	-	45,6	30,1	4460	-
2.1 A3	2,30	6,5	2,1	53,6	30,4	4150	0,94
2.1 N	2,38	4,4	-	55,4	32,3	4340	-
2.2 W1	2,38	4,8	0,4	59,4	30,7	3980	0,95
2.2 C1	2,35	4,0	-0,4	59,8	32	4140	0,99
2.2 C2	2,37	4,4	0,0	56,6	29,9	3970	0,93

+) CEB: $E = 6010 \cdot \sqrt{\beta_W}$

Wassereindringtiefe der Versuchsbetone bei Prüfung nach DIN 1048
Betone der Serie 1 und 2

Beton	Rohdichte	LP-Gehalt				
		p	$p^F - p^O$	β_{W28}	t	$\frac{t^F}{t^O}$
Nr.	kg/dm ³	Vol.-%	Vol.-%	N/mm ²	cm	-
1.1 A	2,34	4,8	1,6	41,6	2,6	1,18
1.1 B	2,33	4,5	1,3	45,6	2,4	1,09
1.1 C2	2,39	3,8	0,6	44,3	5,0	2,27
1.1 N2	2,39	3,2	-	50,5	2,2	-
1.2 B1	2,31	6,2	2,6	33,3	2,6	1,30
1.2 N	2,35	3,6	-	48,7	2,0	-
1.5 B	2,36	4,9	-0,2	44,4	2,9	1,38
1.5 C	2,45	1,6	-3,5	63,6	2,1	1,00
1.5 N	2,35	5,1	-	39,3	2,1	-
1.6 B	2,38	5,2	0,8	47,1	2,3	0,96
1.6 N	2,38	4,4	-	45,6	2,4	-
2.1 A3	2,32	6,5	2,1	53,6	2,7	2,08
2.1 N1	2,38	4,4	-	55,4	1,3	-
2.2 C1	2,37	4,0	0,7	59,8	4,0	2,50
2.2 W3	2,40	5,5	2,2	53,1	1,8	1,13
2.2 N3	2,44	3,3	-	56,0	1,6	-

Makrofotografische Aufnahmen
(Vergrößerung: ca. 15:1)

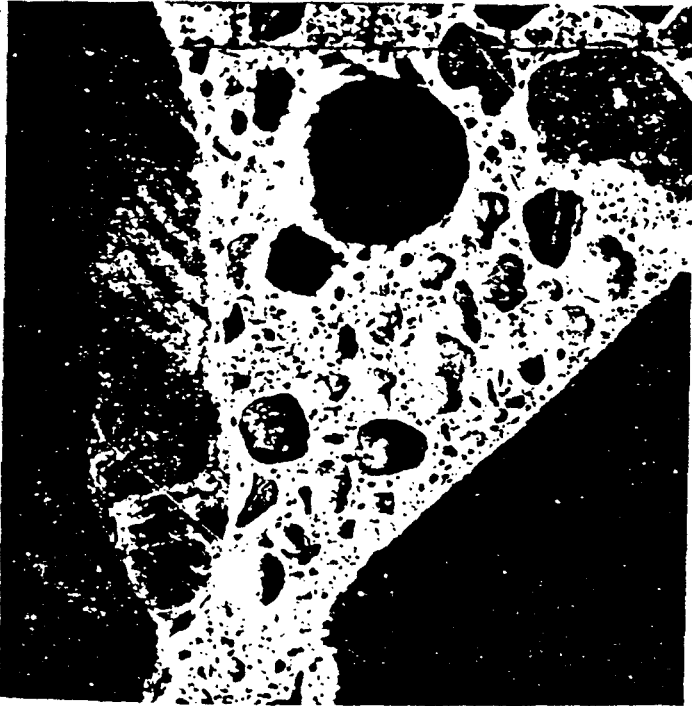


Bild 13: Beton 2.2 C1

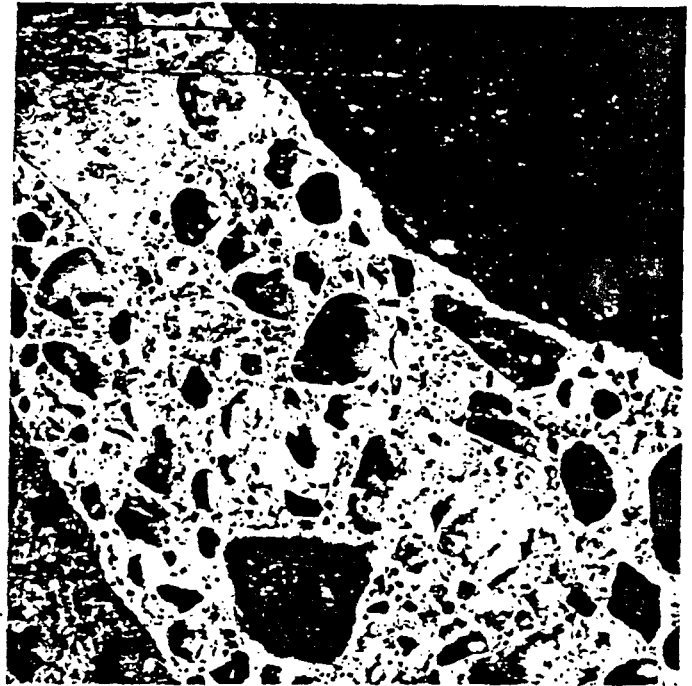


Bild 14: Beton 2.2 C1

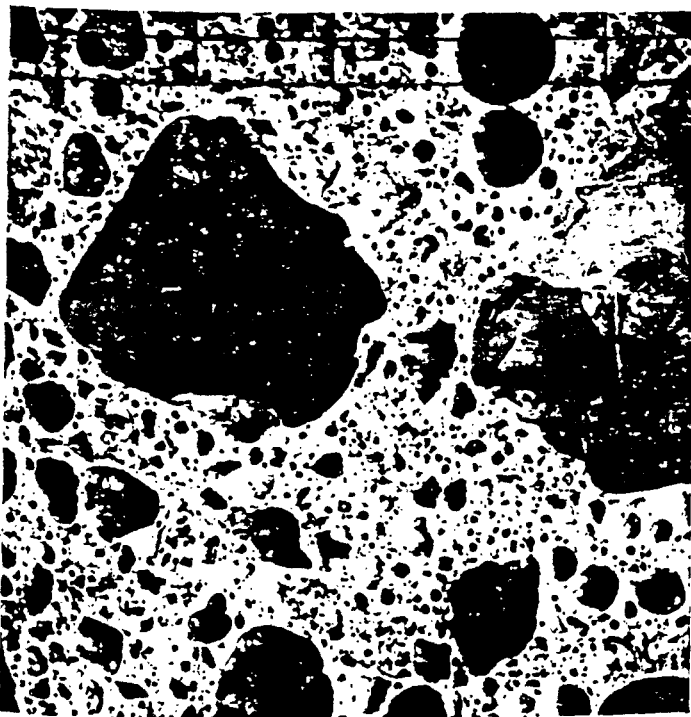


Bild 15: Beton 1.1 B

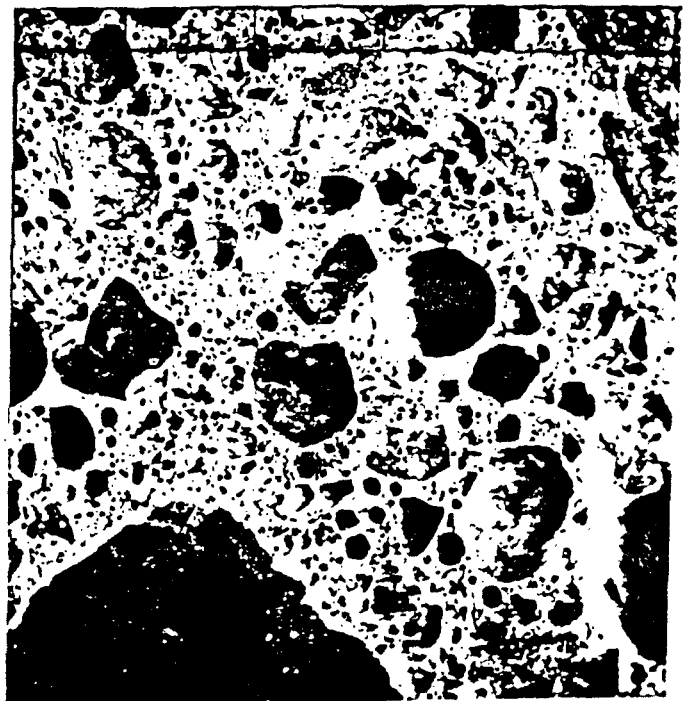


Bild 16: Beton 1.1 B

Luftporenkennwerte im Frischbeton und im Festbeton, bestimmt nach dem makrofotografischen Verfahren

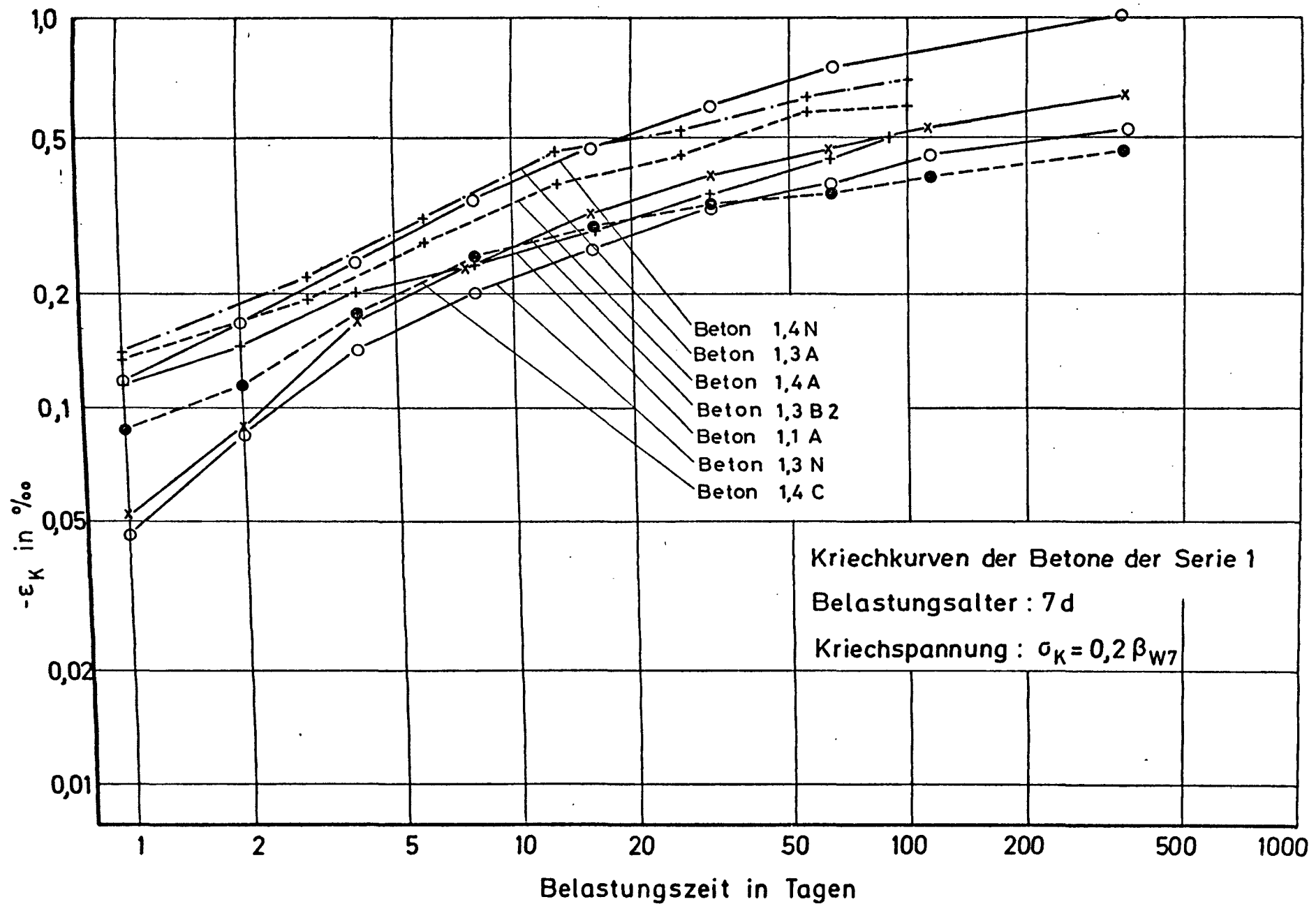
Beton Nr.	LP-Mittel und Dosierung	Luftporengehalt					Anzahl der Sehnen = 0,3 mm	Spez. Oberfläche der Luftporen	Maßgeben- der Ab- stands fak- tor A F
		Frischbet. ^{*)}		Festbeton					
		a p	b p	gesamt p	s ≤ 0,3 mm L 300	s ≤ 0,15 mm L 150			
-	Gew.-% v. ZG.	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	%	cm ² /cm ³	mm
1.3 A2	0,075 A	5,8	4,8	4,9	2,4	1,2	84,9	236	0,21
1.1 B	0,02 B	3,7	4,1	7,0	3,2	1,9	85,8	253	0,16
1.1 C2	0,04 C	5,2	5,0	3,7	1,5	0,8	82,6	221	0,25
1.3 N3	0,065 C	4,6	4,4	3,7	2,2	1,5	92,4	314	0,18
2.1 A	0,07 A	6,5	6,7	6,6	2,5	1,1	77,2	187	0,22
2.2 B	0,02 B	4,5	3,7	3,1	0,9	0,4	73,4	141	0,42
2.2 C1	0,06 C	4,6	4,2	3,5	1,4	0,7	81,5	197	0,28
2.2 N2	0,02 B	4,3	4,7	4,2	2,5	1,7	93,2	352	0,15

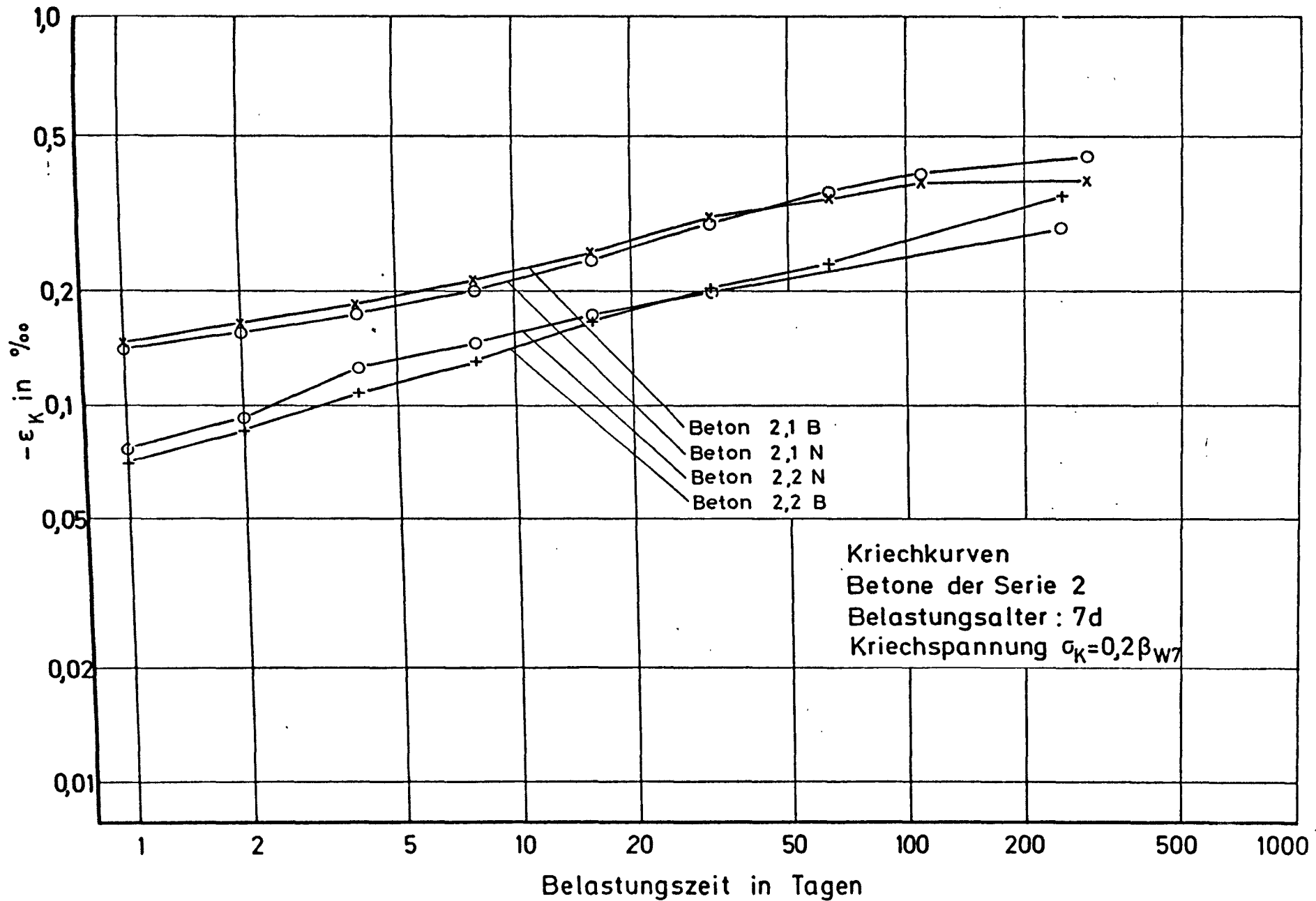
*) Spalte a: Drucktopfmessung, Spalte b: aus der Frischbetonrohddichte errechneter LP-Gehalt für den Probekörper der Festbetonuntersuchung

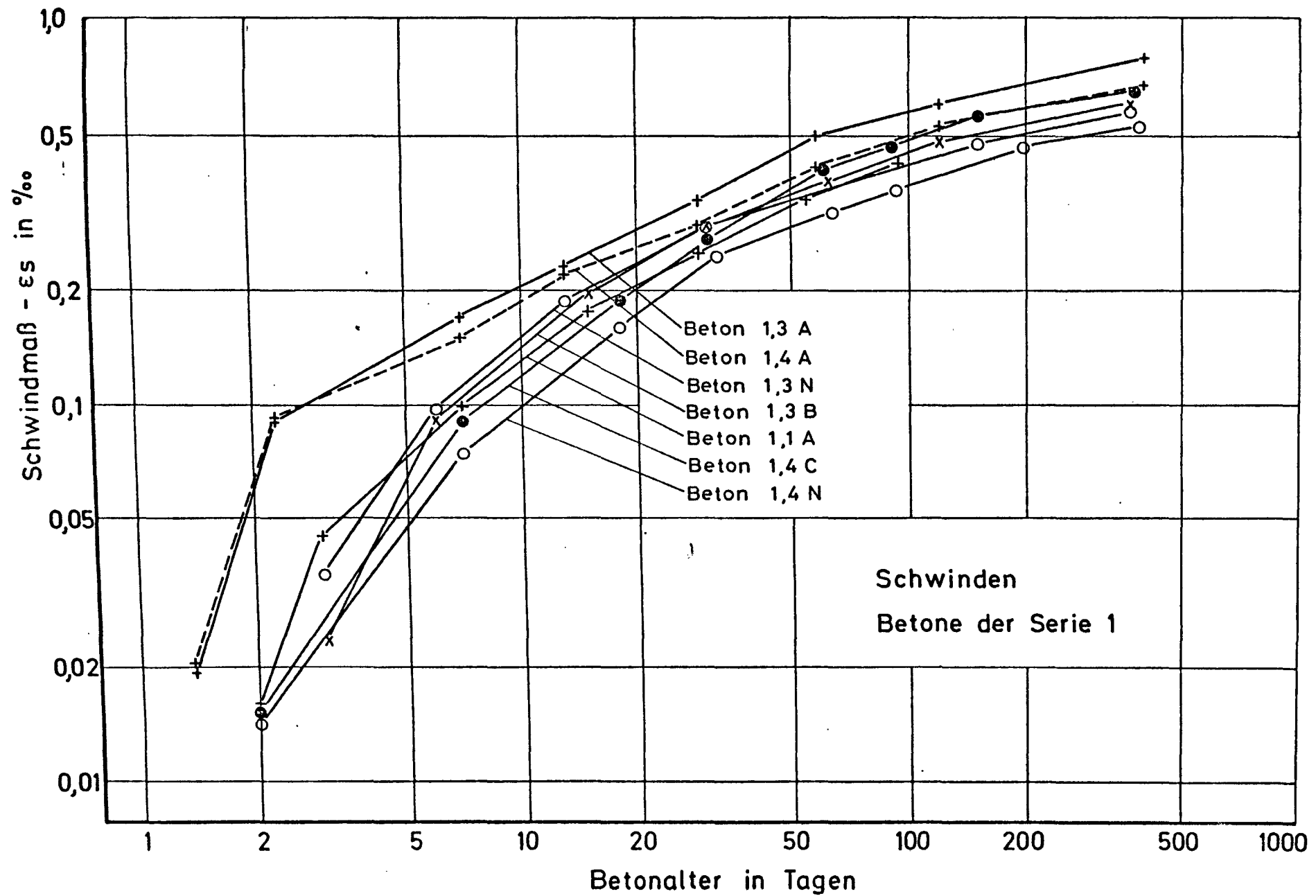
Ergebnisse der Kriech- und Schwindversuche

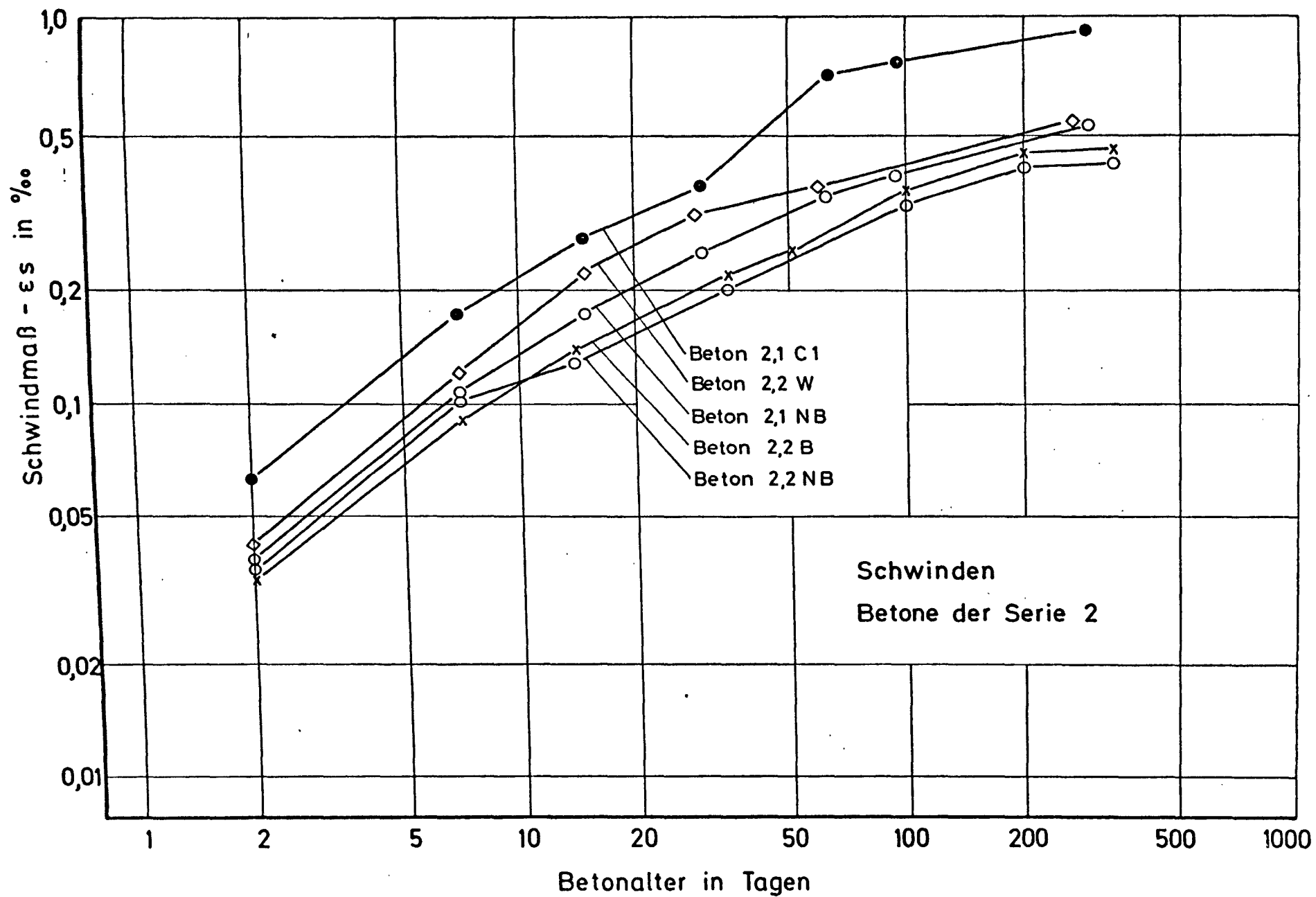
Beton Nr.	Kriech- spannung σ_K	Elast. Dehnung ϵ_{el}	Kriechdehnung		Kriechzahl φ_{360}	Schwinden	
			90 d $\epsilon_{K,90}$	350 d $\epsilon_{K,360}$		90 d $\epsilon_{s,90}$	350 d $\epsilon_{s,360}$
-	N/mm ²	°/°°	°/°°	°/°°	-	°/°°	°/°°
1.1 A	4,3	0,253	0,500	(0,740)	2,92	0,420	-
1.3 A	8,7	0,311	0,690	(0,900)	2,89	0,560	0,770
1.3 B	9,7	0,349	0,500	0,643	1,84	0,440	0,590
1.3 N	9,7	0,349	0,420	0,520	1,49	0,410	0,570
1.4 A	8,7	0,308	0,600	0,820	2,66	0,480	0,660
1.4 C	9,1	0,321	0,380	0,470	1,46	0,470	0,640
1.4 N	9,1	0,369	0,790	1,030	2,79	0,360	0,520
2.1 B	10,8	0,332	0,360	(0,385)	1,16	-	-
2.1 N	10,8	0,343	0,380	(0,450)	1,31	0,390	(0,550)
2.1 C	-	-	-	-	-	0,750	(0,950)
2.2 A	8,7	0,275	0,260	(0,380)	1,38	-	-
2.2 B	-	-	-	-	-	0,340	0,460
2.2 N	8,7	0,271	0,240	(0,310)	1,14	0,310	0,420
2.2 W	-	-	-	-	-	0,410	(0,580)

Anmerkung: Die in Klammern gesetzten Werte wurden durch grafische Extrapolation aus den Kurven auf Anlage 30-33 gewonnen.







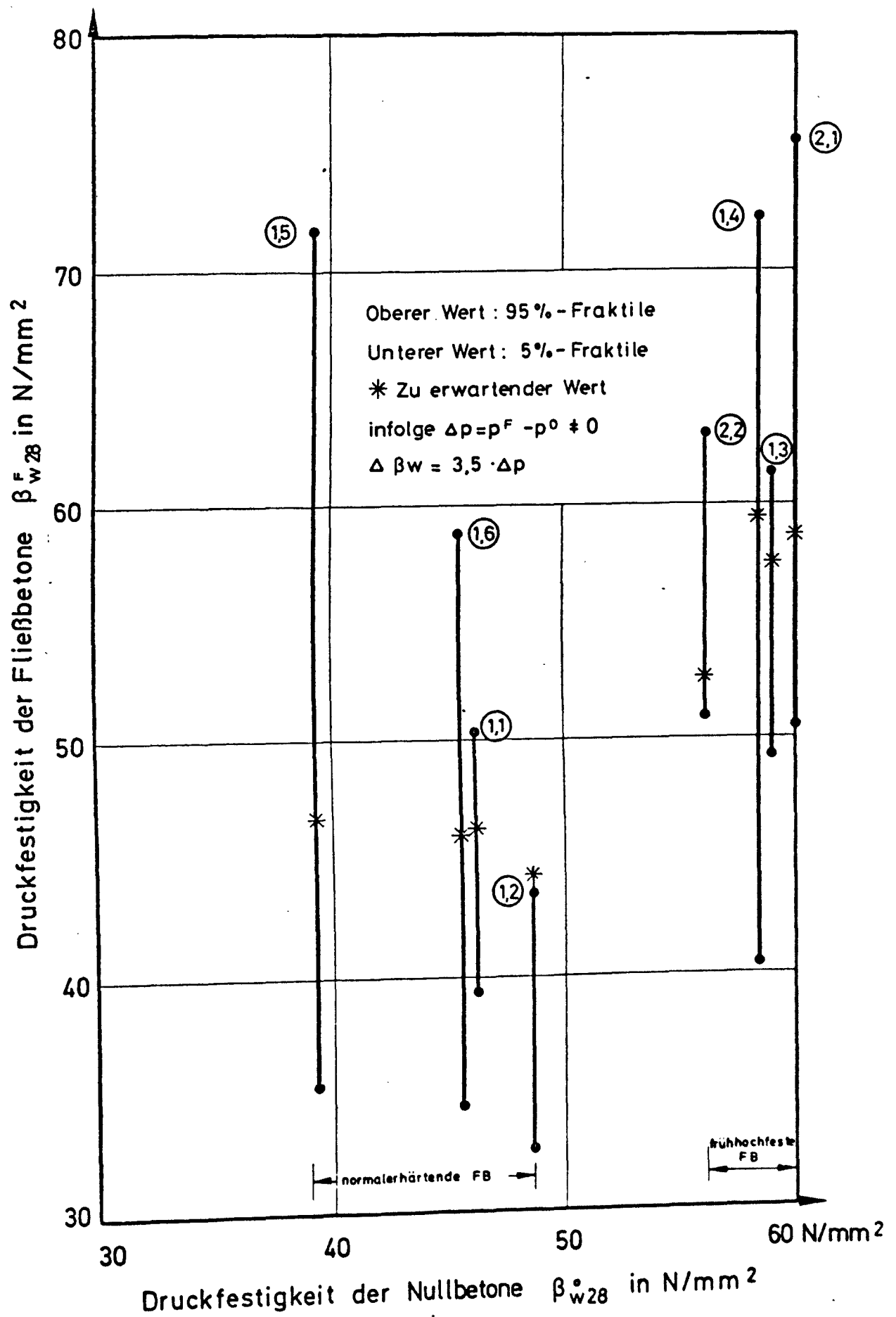


Auswertung der Betondruckfestigkeitswerte nach 28 Tagen β_{W28}

Beton Nr.	-	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2
Nullbeton β_W^0	N/mm ²	46,2	48,7	59,0	58,5	39,3	45,6	60,0	56,1
Luftporendifferenz $\Delta p = p^F - p^0$	Vol.-%	0,0	1,1	0,4	-0,2	- 1,9	- 0,1	0,3	1,1
Druckfestigkeitsunterschied $\Delta\beta$ infolge $\Delta p: \Delta\beta = \Delta p \cdot 4$	N/mm ²	0,0	4,4	1,6	-0,8	- 7,6	- 0,4	1,2	4,4
Zu erwartendes β_W^F infolge Δp $\beta_W^F \text{ Soll} = \beta_W^0 - \Delta\beta$	N/mm ²	46,2	44,3	57,4	59,3	46,9	46,0	58,8	51,7
β_W^F ist	N/mm ²	44,7	38,0	55,4	56,4	53,5	46,7	63,0	57,0
$\beta_W^F \text{ Soll} - \beta_W^F \text{ ist}$	N/mm ²	1,5	6,3	2,0	2,9	- 6,6	- 0,7	- 4,2	- 5,3
Streuung der Einzel- werte von β_W^F	N/mm ²	2,5	4,1	3,0	7,1	8,1	5,4	5,5	8,0
5%-Fraktile von β_W^F +) 95%-Fraktile von β_W^F	N/mm ²	39,3 50,1	32,5 43,5	49,4 61,4	40,4 72,4	35,3 71,7	34,6 58,8	50,6 75,4	51,0 63,0

+) Die Fraktilewerte wurden mit den Annahmefaktoren nach DIN 1048 Teil 4 errechnet

Streubereiche der Fließbetondruckfestigkeiten β_{w28}^F
in Abhängigkeit von der Nullbetondruckfestigkeit



Vebe-West als Funktion
des Feinstsandanteils
Serie 1: Sand A

